



PROYECTO FIN DE CARRERA PLAN 2000

E.U.I.T. TELECOMUNICACIÓN

TEMA: Estudio de la Fiabilidad

TÍTULO: Fiabilidad de Minimodulos de Silicio

AUTOR: Andrés Núñez Bermejo

TUTOR: Manuel Vázquez López **Vº Bº.**

DEPARTAMENTO: ELECTRÓNICA FÍSICA

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: José Antonio Herrera Camacho

VOCAL: Manuel Vázquez López

VOCAL SECRETARIO: Neftali Núñez Mendoza

DIRECTOR:

Fecha de lectura: de Abril de 2014

Calificación: **El Secretario,**

RESUMEN DEL PROYECTO:

El objetivo del proyecto es la evaluación de la fiabilidad de minimódulos fotovoltaicos de Silicio. Para ello se pondrán un conjunto de minimódulos a funcionar en campo y se caracterizarán mediante la evaluación de la curva I-V de los módulos a partir de la cual obtendremos la potencia de los módulos en diferentes condiciones de temperatura. Concretamente se pondrán en funcionamiento tres minimodulos a tres temperaturas diferentes, estando uno de estos minimodulos al limite que pone su datasheet para asi poder estudiar su grado de degradación y poder hacer un ensayo acelerado. A partir de la evolución temporal de las curvas I-V en iluminación y oscuridad se realizará un análisis de la evolución de la fiabilidad de los módulos con el tiempo.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

y

Sistemas de Telecomunicación



PROYECTO FIN DE CARRERA

FIABILIDAD DE MINIMODULOS DE SILICIO

Andrés Núñez Bermejo

Abril 2014

Dedicatoria

Quiero dedicar este proyecto a mis padres, Andrés y Juana, por vuestro apoyo incondicional a la hora de empujarme en esta aventura, de la cual estoy cada día más orgulloso de haberlo conseguido.

A Cecilia, has sido un apoyo vital para poder realizar esta Ingeniería, me has apoyado en los momentos más duros y he tenido que sacrificar mucho tiempo libre, que en vez de pasarlo contigo lo he pasado rodeado de fórmulas y circuitos.

A mi hermana M^a Teresa y a Teresa Martín, por haberme traído todos los apuntes impresos que os pedía, que han sido muchos y sin ellos me hubiera dejado los ojos en el ordenador.

Y como no, quiero dar las gracias a la última persona que ha venido a formar parte de mi vida y que sin ella saberlo me ha dado el último empujón para conseguir acabar, que es mi hija Inés.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Andrés y Juana, por haberme animado a llegar hasta aquí.

Agradezco la ayuda prestada a D. Manuel Vázquez, por su paciencia, por haberme dado la oportunidad de trabajar contigo y que cuando te propuse el proyecto no dudaste un momento en ponerlo en marcha.

A Neftalí Núñez por toda la ayuda prestada para poner en funcionamiento el proyecto.

A todos mis compañeros de clase, que me han enseñado lo que es el compañerismo, que me han acompañado durante tantísimo tiempo en los laboratorios, en las horas de estudio en la biblioteca, realizando trabajos,... sin ellos, no habría sido igual.

Y una vez mas a Cecilia por su inmejorable compañía y apoyo.

En general, a todos los que han estado a mi lado todos estos años, ¡GRACIAS!

RESUMEN

El objetivo de este Proyecto Final de Carrera es la realización de un ensayo de fiabilidad de componentes electrónicos, más concretamente de Minimódulos de Silicio, con el fin de estudiar su comportamiento a lo largo del tiempo de vida. Debido a la larga duración de los Minimódulos de Silicio, un ensayo de este tipo podría durar años, por lo que es necesario realizar un ensayo acelerado que acorte significativamente el tiempo del experimento, para ello, han de someterse a esfuerzos mayores que en condiciones normales de funcionamiento.

A día de hoy, los Minimódulos de silicio, que conocemos como placas solares fotovoltaicas, se usan en infinidad de dispositivos debido a las múltiples ventajas que conllevan. La principal ventaja es poder llevar electricidad a cualquier parte del planeta sin necesidad de tener que hacer unas elevadas inversiones. Esta electricidad proviene de una fuente de energía inagotable y nada contaminante, con lo que ayudamos a mantener el equilibrio del planeta. La mayoría de las veces estas placas solares fotovoltaicas se usan en el exterior, soportando cambios de temperatura y de humedad elevados, de ahí, la importancia de realizar ensayos de fiabilidad, que muestren sus posibles causas de fallo, los efectos que producen estos fallos y los aspectos de diseño, fabricación y mantenimiento que puedan afectarles.

Los Minimódulos de silicio utilizados en este proyecto son el modelo MC-SPO.8-NF-GCS de la empresa fabricante Multicomp. Para realizar el Proyecto hubiéramos necesitado una cámara climática que simulara unas condiciones ambientales determinadas, pero debido a la dificultad de iluminar el módulo dentro de la cámara climática hemos desarrollado un nuevo sistema de ensayos acelerados en temperatura.

El nuevo sistema de ensayos acelerados consiste en:

- Colocar los módulos fotovoltaicos en el laboratorio con un foco de 500W que irradia lo equivalente al sol.
- Los tres módulos trabajarán a tres temperaturas diferentes para simular condiciones ambientales distintas, concretamente a 60°C, 72°C y 84°C.
- Mediante un sistema automático de medida diseñado en LabVIEW, de manera simultánea tomará medidas de tensión en las tres placas y estudiaremos el grado de degradación en cada placa.

Se analizarán los resultados obtenidos de cada una de las medidas y se realizará un estudio de fiabilidad y del proceso de degradación sufrido por los Minimódulos de silicio.

Este PFC se puede dividir en las siguientes fases de trabajo siendo el ensayo la parte más larga en el tiempo:

- Búsqueda de bibliografía documentación y normas aplicables.
- Familiarización con los equipos y software, estudiando el manejo del software que viene con el Multímetro Keithley 2601 y el programa LabVIEW.
- Desarrollo del hardware y sistemas necesarios para la realización del ensayo.
- Montaje del ensayo
- Realización del ensayo.
- Análisis de resultados.

ABSTRACT

The objective of this Final Project is conducting a test reliability of electronic components, more specifically Silicon minimodules, in order to study their behavior throughout the life span. Due to the long duration of Silicon minimodules a test like this could take years, so it is necessary to perform an accelerated significantly shorten the time of the experiment, testing for it, should be subjected to greater efforts than in normal operating.

Today, the mini-modules, silicon is known as photovoltaic solar panels are used in a multitude of devices due to the many advantages they bring. The main advantage is to bring electricity to anywhere in the world without having to make high investments. This electricity comes from an inexhaustible source of energy and no pollution, thus helping to maintain the balance of the planet. Most of the time these solar photovoltaic panels are used on the outside, enduring changes in temperature and high humidity, hence, the importance of reliability testing, showing the possible causes of failure, the effects produced by these faults and aspects of design, manufacturing and maintenance that may affect them.

The silicon mini-modules used in this project are the MC-SPO.8-NF-GCS model Multicomp manufacturing company. To realize the project we would have needed a climatic chamber to simulate specific environmental conditions, but due to the difficulty of illuminating the module in the climate chamber we have developed a new system of accelerated tests in temperature.

The new system is accelerated tests:

- Place the PV modules in the laboratory with a focus on the equivalent 500W radiating sun.
- The three modules work at three different temperatures to simulate different environmental conditions, namely at 60 °C, 72 °C and 84 °C.
- Automatic measurement system designed in LabVIEW, simultaneous voltage measurements taken at the three plates and study the degradation degree in each plate.

The results obtained from each of the measurements and a feasibility study and degradation suffered by the silicon is performed minimodules were analyzed.

This PFC can be divided into the following phases of the test work the longest part being over time:

- Literature search and documentation standards.
- Familiarization with equipment and software, studying management software that comes with the Keithley 2601 multimeter and the LabVIEW program.
- Development of hardware and systems necessary for the conduct of the trial.
- Experiment setup
- Carrying out the experiment.
- Analysis of results.

ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

La memoria se ha organizado de la siguiente manera:

- Parte teórica: Temas 1, 2 y 3.
- Desarrollo del ensayo: Tema 4.
- Presentación y análisis de resultados: Capítulo 5.
- Conclusiones Capítulo 6.

ÍNDICE

TEMA 1 – INTRODUCCION	11
1.1. Situación energética	11
1.2. Fuente de energía limitada	17
1.2.1. Petróleo	17
1.2.2. Gas natural	19
1.2.3. Carbón	21
1.3. Energías renovables	24
1.3.1. Eólica	24
1.3.2. Geotermia	37
1.3.3. Energía hidroeléctrica	31
1.3.4. Energía mareomotriz	35
1.3.5. Biocombustibles	37
1.3.6. Energía solar fotovoltaica	39
1.4. Conclusiones Tema 1	42
TEMA 2 – ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	43
2.1. Introducción	43
2.2. Iluminación de cristales de silicio	43
2.3. Efecto fotovoltaico	45
2.4. Curva I-V	47
2.5. Corriente de cortocircuito y tensión de circuito abierto	48
2.6. Punto de máxima potencia	49
2.7. Factor de forma y eficiencia de conversión energética	50
2.8. Influencia de la temperatura y la irradiancia	51
2.9. Tipos de instalaciones: Autónomos y conectados a red	55
2.9.1. Sistemas fotovoltaicos autónomos	55
2.9.2. Sistemas fotovoltaicos conectados a red	61
2.10. Conclusiones Tema 2	71
TEMA 3 – FIABILIDAD DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	72
3.1. Introducción	72
3.2. Conceptos de Fiabilidad	73
3.2.1 Merito de un sistema	73
3.2.2 Probabilidad	74
3.2.3 Efectividad de un sistema	75
3.3. Definición de fiabilidad	75

3.4. Concepto de fallo	76
3.4.1. Fallos catastróficos y por degradación	76
3.4.2. Fallos iniciales, por desgaste y aleatorios	77
3.4.3. Fallos primarios y secundarios	77
3.5. Esfuerzo de componentes	78
3.6. Ensayos de fiabilidad de placas solares fotovoltaicas	78
3.7. Conclusiones Tema 3	80
TEMA 4 – MONTAJE E INSTRUMENTACIÓN	81
4.1. Descripción de los equipos	81
4.2. Procedimiento de ensayo	90
4.2.1. Caracterización de las células	90
4.3. Caracterización de la iluminación	100
4.4. Condiciones de funcionamiento	107
4.4.1. Tres temperaturas diferentes	108
4.4.2. Células en su punto de máxima potencia	110
4.4.3. Medida continua de tensión	111
4.5. Conclusiones Tema 4	113
TEMA 5 – RESULTADOS	114
5.1 Conclusiones Tema 5	132
TEMA 6- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	133
BIBLIOGRAFÍA	135

TEMA 1 – INTRODUCCION

Hemos decidido hacer un proyecto fin de carrera sobre módulos fotovoltaicos debido al uso que tienen hoy en día, ya que los podemos encontrar desde el uso en parquímetros hasta su uso en el espacio. Esto es, gracias al uso de energía solar fotovoltaica podemos disfrutar de energía eléctrica en cualquier parte del globo, en sitios donde antes sería impensable llevar un punto de red eléctrica ya que sería con unos elevados costes. Esta habiendo un auge en el uso de placas solares fotovoltaicas porque tienen una alta fiabilidad y los fabricantes garantizan por un mínimo de 20 o 30 años lo cual las hace muy atractivas al consumidor. Nosotros para poder comprobar esta alta fiabilidad hemos querido hacer un ensayo acelerado poniendo una de estas placas solares en condiciones ambientales máximas de lo que nos asegura el fabricante y así poder comprobar el grado de dureza y resistencia de los materiales que lleva. A continuación vamos a describir la situación energética mundial para ver donde se encuadra el uso de la energía solar fotovoltaica.

1.1- SITUACION ENERGETICA

El sistema energético mundial se basa en el uso de combustibles fósiles, es decir combustibles no renovables y altamente contaminantes. El progreso tecnológico, por una parte y el acelerado crecimiento demográfico, por la otra, producen la alteración del medio, llegando en algunos casos a atentar contra el equilibrio biológico de la Tierra traduciéndolo en contaminación. Para ello es necesario proteger los recursos renovables y no renovables y tomar conciencia de que el saneamiento del ambiente es fundamental para la vida sobre el planeta. La contaminación es uno de los problemas ambientales más importantes que afectan a nuestro mundo y surge cuando se produce un desequilibrio, como resultado de la adición de cualquier sustancia al medio ambiente, en cantidad tal, que cause efectos adversos en el hombre, en los animales, vegetales o materiales expuestos a dosis que sobrepasen los niveles aceptables en la naturaleza.

La contaminación puede surgir a partir de ciertas manifestaciones de la naturaleza (fuentes naturales) o bien debido a los diferentes procesos productivos del hombre (fuentes antropogénicas) que conforman las actividades de la vida diaria.

Las fuentes que generan contaminación de origen antropogénico más importantes son: industriales (frigoríficos, mataderos y curtiembres, actividad minera y petrolera), comerciales (envolturas y empaques), agrícolas (agroquímicos), domiciliarias (envases, pañales, restos de jardinería) y fuentes móviles (gases de combustión de vehículos). Como fuente de emisión se entiende el origen físico o geográfico donde se produce una liberación contaminante al ambiente, ya sea al aire, al agua o al suelo. Tradicionalmente el medio ambiente se ha dividido, para su estudio y su interpretación, en esos tres

componentes que son: aire, agua y suelo; sin embargo, esta división es meramente teórica, ya que la mayoría de los contaminantes interactúan con más de uno de los elementos del ambiente.

El segundo problema importante que podemos tener es que estos combustibles fósiles se suelen encontrar en países que los podemos llamar “conflictivos”, debido a que tienen un inestabilidad política muy grande o están sometidos a duros regímenes totalitarios.

Como posible solución a estos problemas, esta el uso de energías renovables de las que vamos a hacer en este capítulo una breve introducción, empezando por el crecimiento en el uso de energías renovables y reduciendo el uso de energías no renovables.

A día de hoy existe un desequilibrio importante debido a los denominados países emergentes que debido a su incremento sustancial en energía que la están consiguiendo de la combustión de materiales como pueden ser petróleo, carbón, gas natural, energía nuclear. Esto conlleva a un incremento en la contaminación ambiental.

Como podemos comprobar con las siguientes graficas que nos indican el incremento de uso de energía desde que se tienen las primera mediciones en 1971 hasta prácticamente día de hoy, medido en MTOE (Millones de toneladas equivalentes de petróleo), vemos como se ha producido un incremento alarmante y desproporcionado.

□

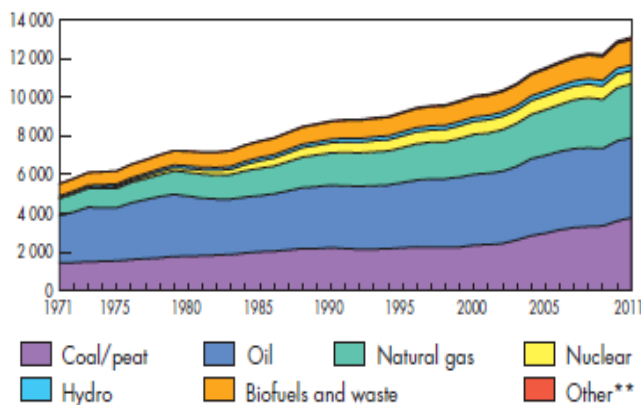


Figura 1: Incremento del consumo de energía a nivel mundial desde 1971-2011. Figura adaptada de *Key World Energy Statistics 2013*.

□

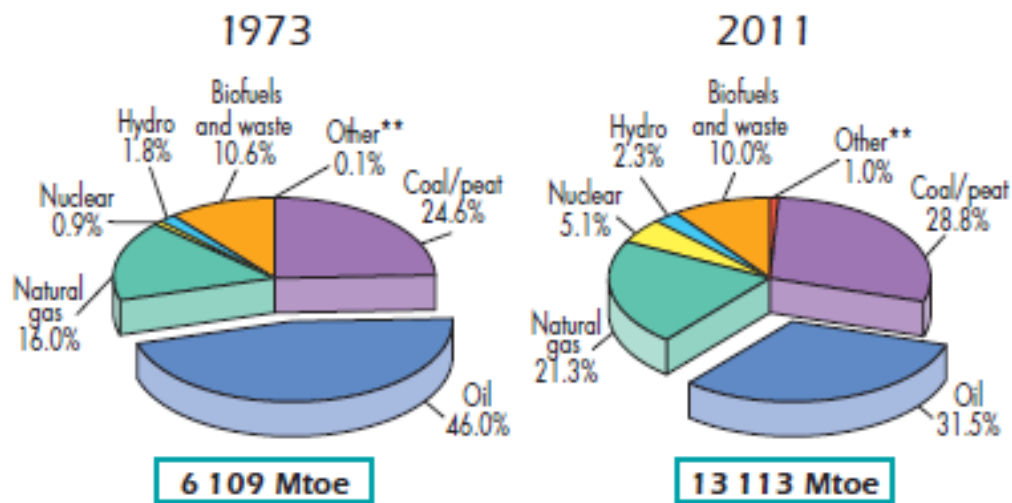


Figura 2: Incremento de consumo de energía por combustibles fósiles y nuclear. Figura adaptada de Key World Energy Statistics 2013.

Como podemos comprobar en las graficas en 20 años se ha duplicado el consumo de energía. Si nos vamos a mirar por regiones empezando por la OECD que aglutina a los 30 países más industrializados del mundo hubo un aumento, pero en los últimos años se está estabilizando e incluso decayendo el consumo de energía. Esto puede ser porque en los últimos años el predominante en la industria es el uso de dispositivos que requieran un menor consumo de energía.

□

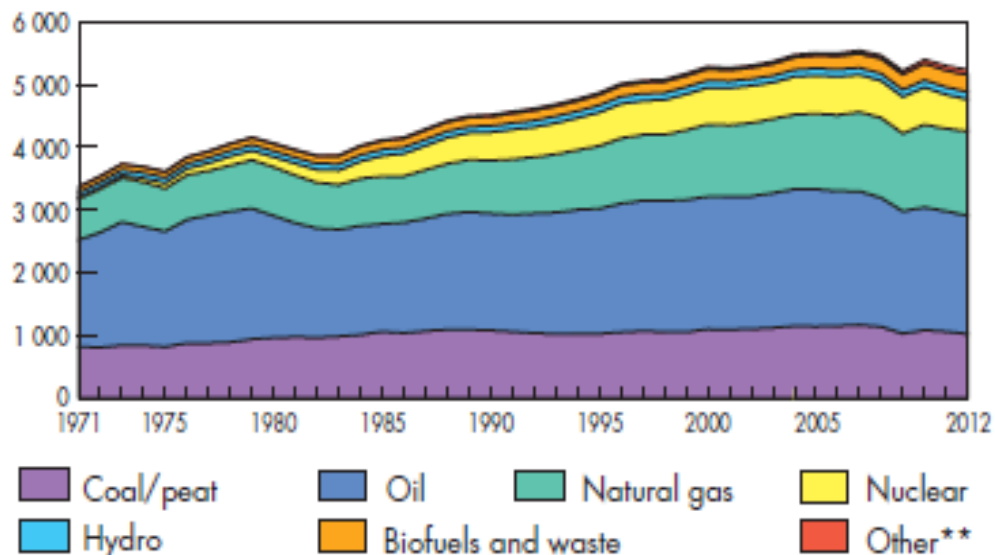


Figura 3: Incremento del consumo de consumo de combustibles fósiles y nuclear en MTOE. Figura adaptada de Key World Energy Statistics 2013.

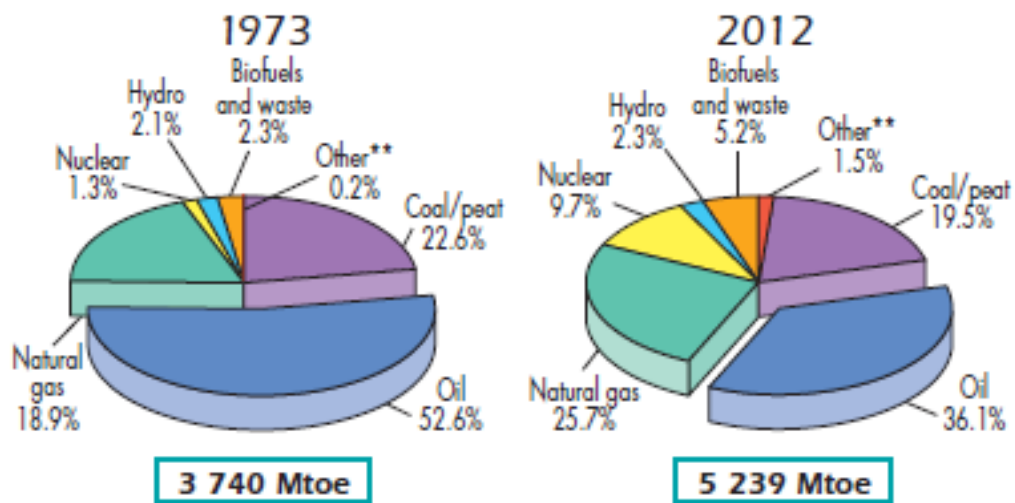


Figura 4: Incremento del consumo de combustibles fósiles y nuclear en MTOE desde 1973-2012. Figura adaptada de Key World Energy Statistics 2013.

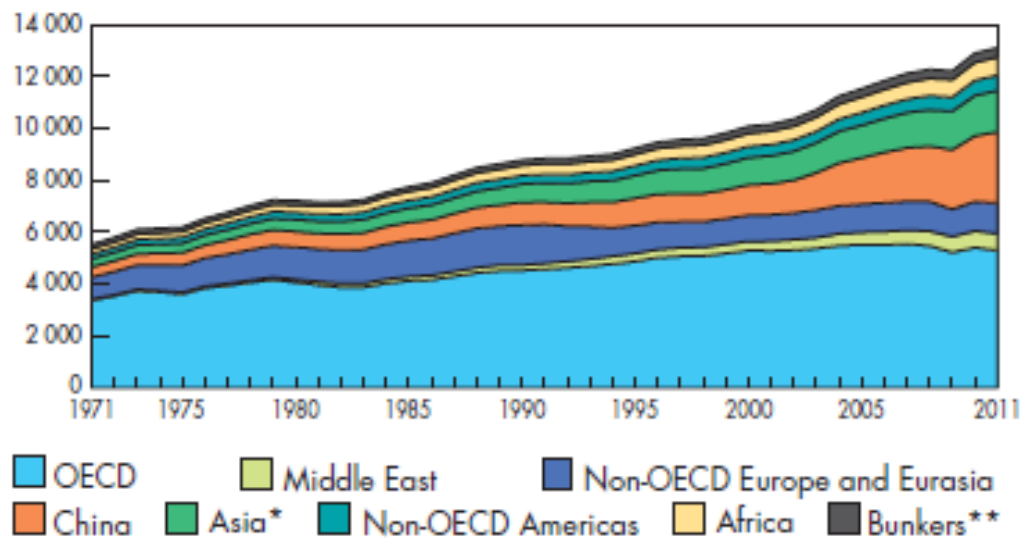


Figura 5: Grafica del consumo de energía en el mundo por regiones desde 1971-2011. Figura adaptada de Key World Energy Statistics 2013.

□

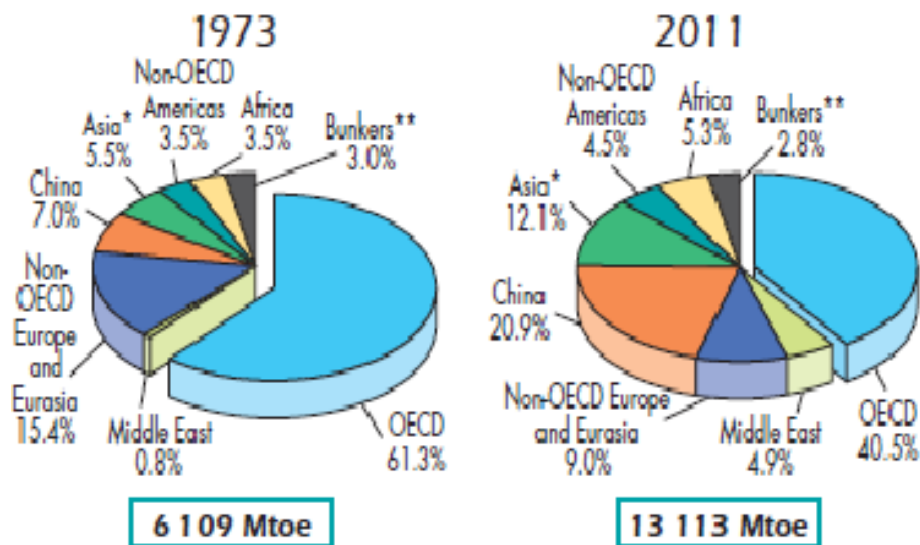


Figura 6: Incremento del consumo de energía en MTOE por regiones en el mundo, excepto China. Figura adaptada de Key World Energy Statistics 2013.

Aquí podemos comprobar como ha habido un incremento devastador en los países emergentes como pueden ser China y resto de Asia.

□

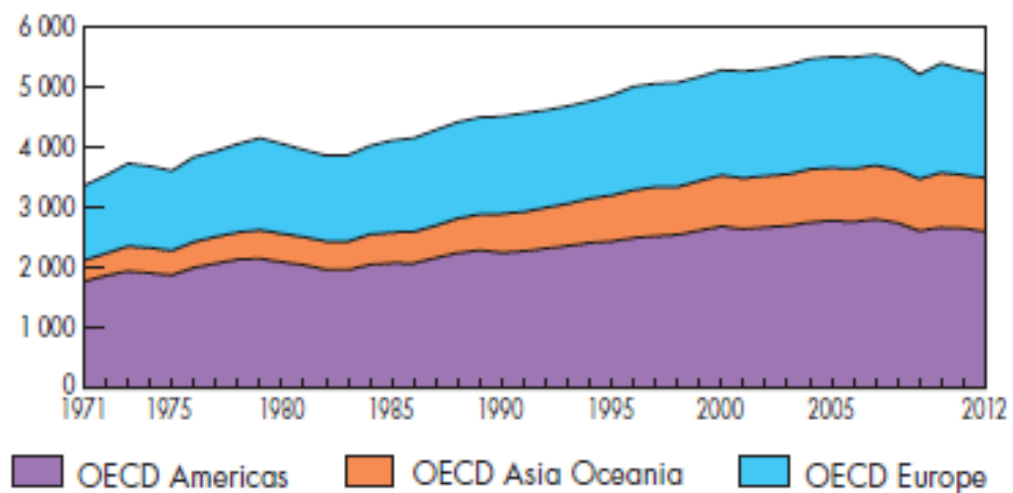


Figura 7: Incremento del consumo de energía por regiones. Figura adaptada de Key World Energy Statistics 2013.

□

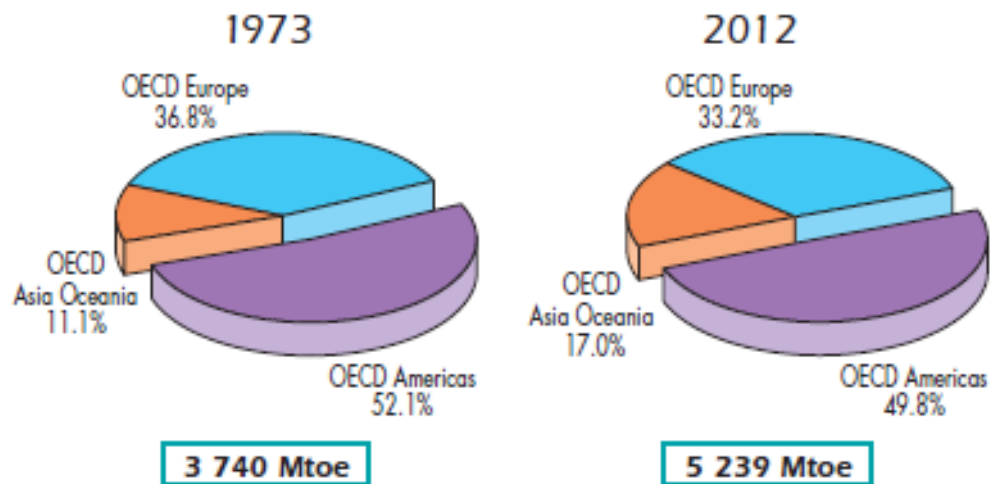


Figura 8: Incremento del consumo de energía por regiones en MTOE. Figura adaptada de Key World Energy Statistics 2013.

Si volvemos a países que componen la OECD y los separamos en diversas regiones aquí podemos comprobar cómo en Europa ha comenzado a bajar junto con América pero en OECD Asia ha habido un incremento menor que en las otras graficas donde están los países que no pertenecen a la OECD.

De todo lo expuesto anteriormente nos tenemos que quedar que en los países industrializados esta habiendo un descenso en consumo de energía debido principalmente a un cambio económico que requiere menos energía y al uso de sistemas de energía más eficientes, mientras que en los países emergentes están duplicando su consumo ya que no tienen acceso a estos sistemas de energéticos eficientes.

1.2- FUENTE DE ENERGÍA LIMITADA

Este consumo de energía la sacamos de la quema de minerales fósiles y no renovables como pueden ser: petróleo, gas-natural, carbón.

1.2.1 PETRÓLEO

□

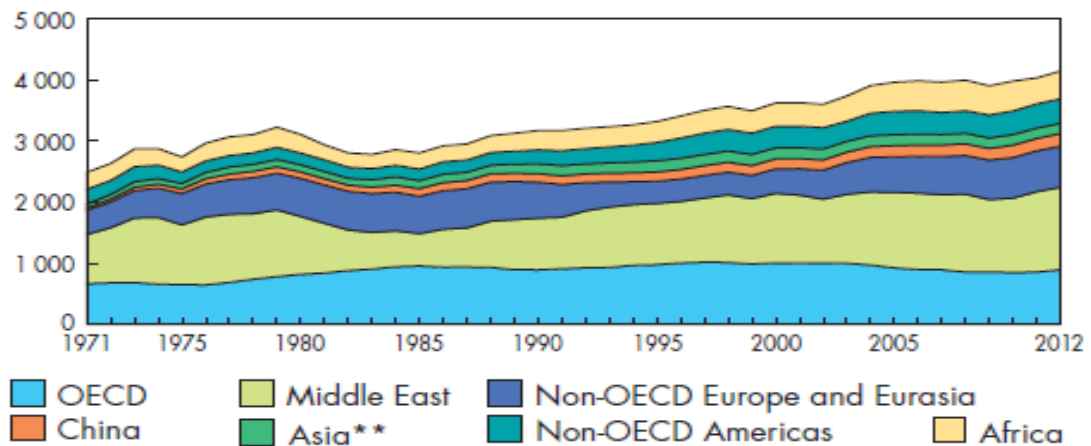


Figura 9: Producción de petróleo a nivel mundial por regiones desde 1971-2012. Figura adaptada de Key World Energy Statistics 2013.

□

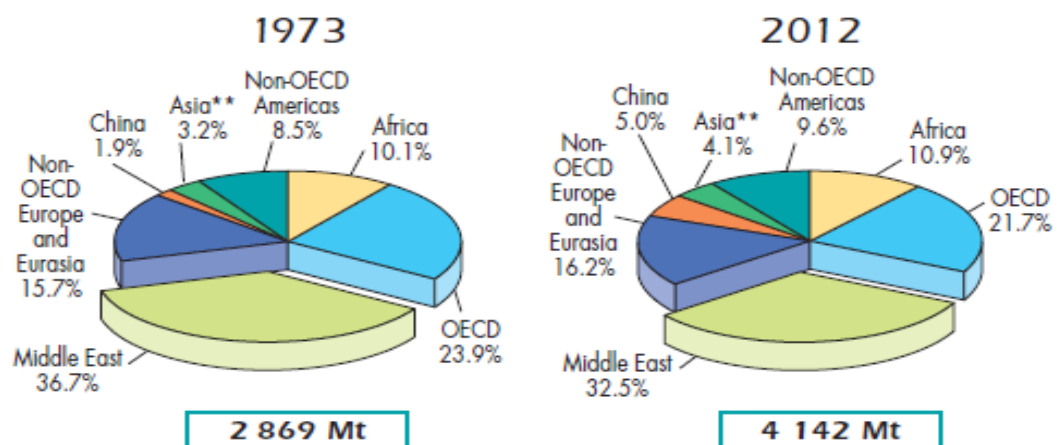


Figura 10: Producción de petróleo a nivel mundial en MTOE. Figura adaptada de Key World Energy Statistics 2013.

□

Producers	Mt	% of world total	Net importers	Mt
Saudi Arabia	544	13.1	United States	500
Russian Federation	520	12.6	People's Rep. of China	251
United States	387	9.3	Japan	177
People's Rep. of China	206	5.0	India	172
Islamic Rep. of Iran	186	4.5	Korea	125
Canada	182	4.4	Germany	90
United Arab Emirates	163	3.9	Italy	77
Venezuela	162	3.9	France	64
Kuwait	152	3.7	Singapore	58
Iraq	148	3.6	Netherlands	57
Rest of the world	1 492	36.0	Others	508
World	4 142	100.0	Total	2 079

Tabla 1: Comparación entre países productores y países importadores a nivel mundial. Figura adaptada de Key World Energy Statistics 2013.

Dando una explicación a estas graficas podemos explicar que creció en 890.000 barriles por día (b / d) , o un 0,9 % , por debajo del promedio histórico. El petróleo tuvo la tasa de crecimiento global más débil entre los combustibles fósiles , por tercer año consecutivo. El consumo de la OCDE se redujo en 1,3 % (530 mil b / d), el sexto descenso en los últimos siete años, la OCDE representa actualmente sólo el 50,2 % del consumo mundial , el porcentaje más bajo de la historia. Fuera de la OCDE , el consumo creció un 1,4 millones de b / d , o 3,3 %.

China registró de nuevo el mayor incremento del consumo global (470.000 b / d , 5 %) , aunque la tasa de crecimiento fue inferior a la media de 10 años. El consumo japonés creció en 250.000 b / d (6,3 %) , el más fuerte incremento de crecimiento desde 1994. La OPEP representó alrededor de tres cuartas partes del aumento mundial a pesar de una disminución de la producción iraní (-680.000 b / d), debido a las sanciones internacionales.

Los países no miembros de la OCDE representaron dos tercios del incremento neto, aumentando en 320.000 b / d. Rendimientos de la OCDE aumentaron en 160.000 b / d, con continuas caídas de rendimiento en Europa más que compensados por el rendimiento aumenta en América del Norte, donde los EE.UU. se ha consolidado como un exportador neto de productos. La utilización mundial de la capacidad de refinería mejoró a 82.4.

Después de haber hecho todos estos análisis nos tenemos que preguntar cuánto petróleo nos queda en el mundo este es un cálculo imposible de hacer con exactitud; todos los días se descubren yacimientos y cada día se revela que algunas reservas no tienen la magnitud esperada. La británica BP aventura la cifra de 1,37 billones de barriles como volumen de reservas mundiales. Al ritmo de consumo actual (85,9 millones de barriles diarios, según la Agencia Internacional de la Energía, AIE), dará para los próximos 60 años. Pero, lejos de disminuir, el consumo de petróleo proseguirá su infatigable aumento en las próximas décadas.

□



Figura 11: Reservas probadas mundiales de petróleo. Figura adaptada de www.bbc.co.uk/spanish/specials/1421_petroleo/index.shtml

1.2.2 GAS NATURAL

□

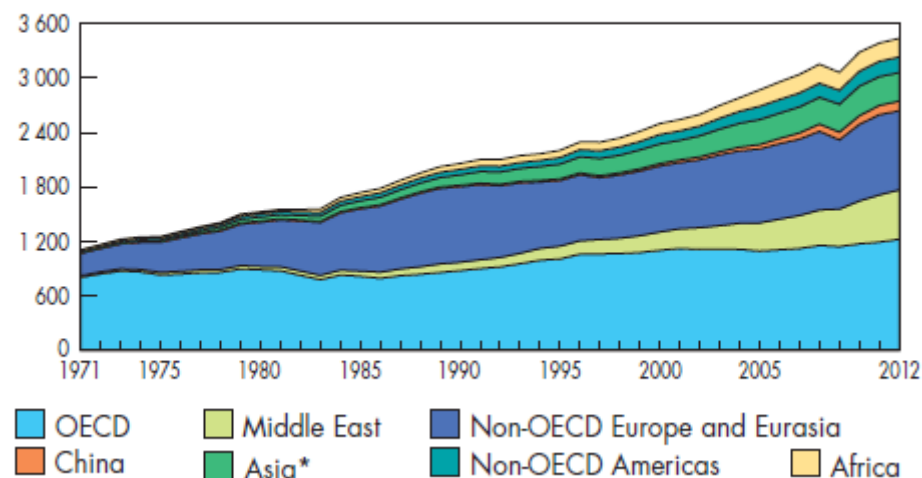


Figura 12: Incremento en la producción de Gas Natural en BCM (billones de metros cúbicos) por regiones desde 1971-2012. Figura adaptada de Key World Energy Statistics. 2013.

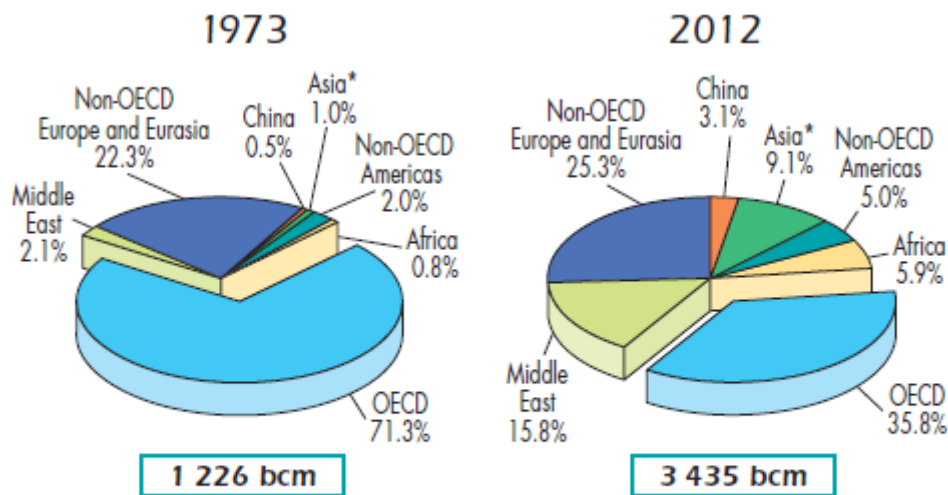


Figura 13: Incremento de países productores de gas natural desde 1971-2012 en BCM por regiones excluida China. Figura adaptada de Key World Energy Statistics. 2013.

Producers	bcm	% of world total
United States	681	19.8
Russian Federation	656	19.1
Qatar	160	4.7
Islamic Rep. of Iran	158	4.6
Canada	157	4.6
Norway	115	3.3
People's Rep. of China	107	3.1
Saudi Arabia	95	2.8
Netherlands	80	2.3
Indonesia	77	2.2
Rest of the world	1 149	33.5
World	3 435	100.0

Net importers	bcm
Japan	122
Germany	70
Italy	68
Korea	48
Turkey	45
United States	43
France	43
United Kingdom	37
People's Rep. of China	36
Ukraine	32
Others	283
Total	827

Tabla 2: Comparación entre países productores y países importadores a nivel mundial. Figura adaptada de Key World Energy Statistics 2013.

El consumo de gas natural mundial creció un 2,2 % , por debajo del promedio histórico de 2,7.

Según la AIE el mundo tiene garantizado 250 años de gas natural, gracias al gas "poco convencional" situado en el interior de la corteza terrestre". Pero nuevas estimaciones sitúan esta cifra muy por encima de los 250 años.

Reservas actuales de Gas Natural por países:

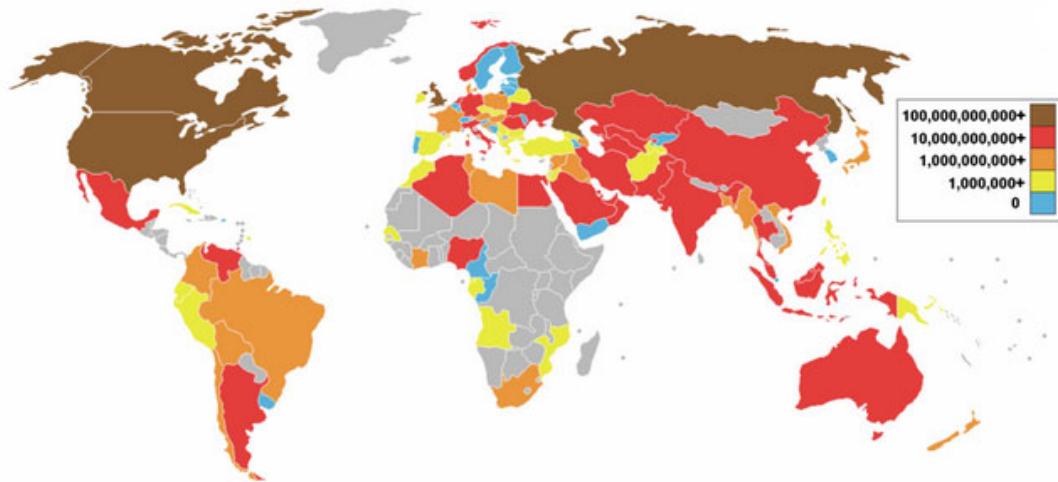


Figura 14: Reservas actuales de Gas Natural por países. Figura adaptada de www.elecode lospasos.net

1.2.3 CARBÓN

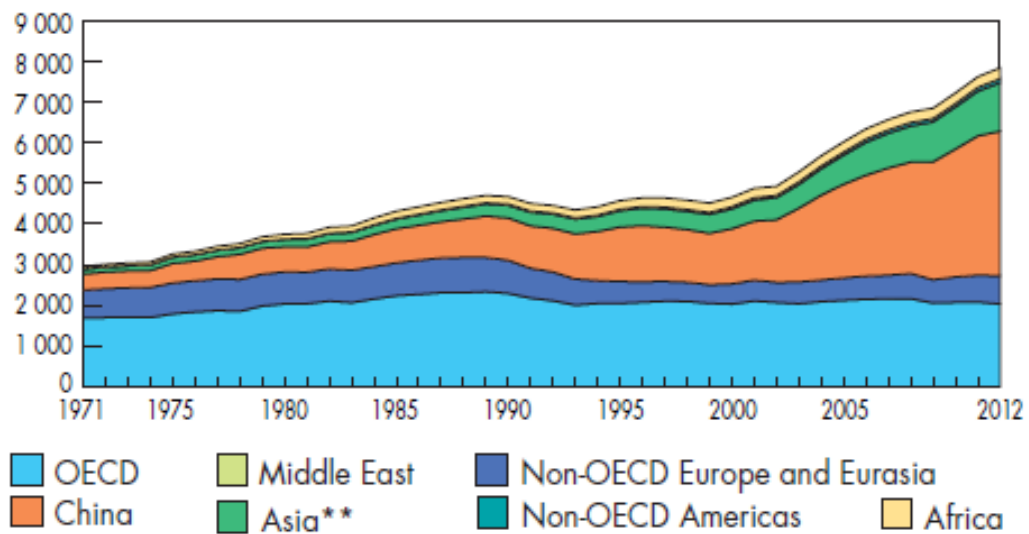


Figura 15: Producción de Carbón desde 1971-2012 por regiones en Mt (millones de toneladas). Figura adaptada de Key World Energy Statistics. 2013.

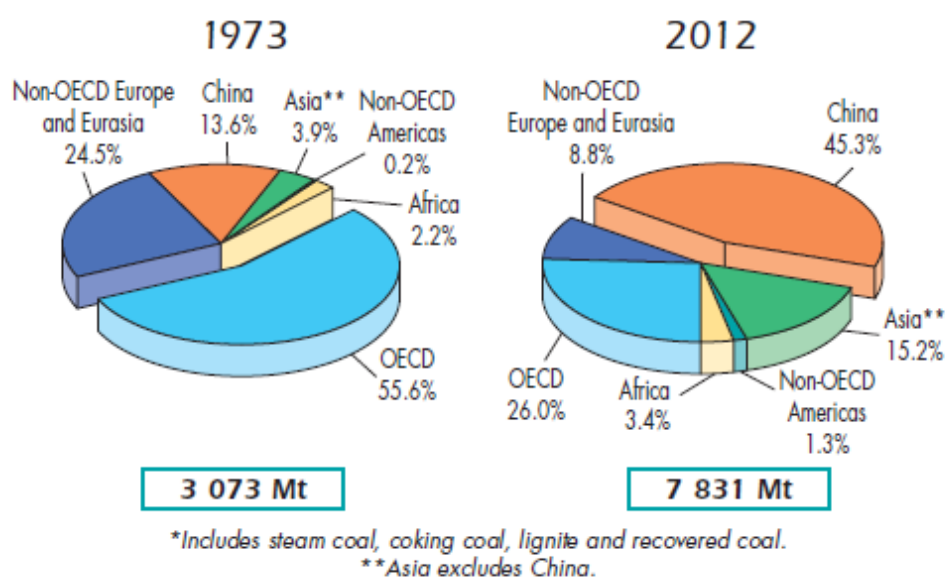


Figura 16: Incremento de países productores de carbón en Mt. Figura adaptada de Key World Energy Statistics. 2013.

Producers	Mt	% of world total
People's Rep. of China	3 549	45.3
United States	935	11.9
India	595	7.6
Indonesia	443	5.7
Australia	421	5.4
Russian Federation	354	4.5
South Africa	259	3.3
Germany	197	2.5
Poland	144	1.8
Kazakhstan	126	1.6
Rest of the world	808	10.4
World	7 831	100.0

Net importers	Mt
People's Rep. of China	278
Japan	184
India	158
Korea	126
Chinese Taipei	65
Germany	45
United Kingdom	44
Turkey	29
Italy	24
Malaysia	22
Others	213
Total	1 188

Tabla 3: Comparación entre países productores y países importadores a nivel mundial. Figura adaptada de Key World Energy Statistics 2013.

El consumo de carbón creció un 2,5 % en 2012, muy por debajo del promedio de 10 años de 4,4 %, pero sigue siendo el más rápido crecimiento de los combustibles fósiles . El consumo fuera de la OCDE aumentó en un volumen inferior a la media del 5,4%.

Anteriormente el crecimiento del consumo chino era inferior a la media del 6,1% , pero a día de hoy China representa más de la mitad del consumo mundial de carbón por primera vez. La producción mundial de carbón creció un 2 % , con un crecimiento en China (3,5 %) e Indonesia (9 %) compensando una disminución de los EE.UU. (-7,5 %). Carbón alcanzó el mayor porcentaje de consumo de energía primaria global (29,9 %) desde 1970, un 89 %, representando el 82 % de la caída global.

El carbón en el mundo es de los minerales que mas diversificado esta pudiéndolo encontrar en la mayoría de países, pero a la pregunta de cuanto carbón queda según los últimos estudios con el actual ritmo de consumo se calculan reservas de carbón para algo más de 200 años, aunque si se tienen en cuenta las que no son fáciles de explotar en el momento actual, las reservas podrían llegar para otros mil años.

□

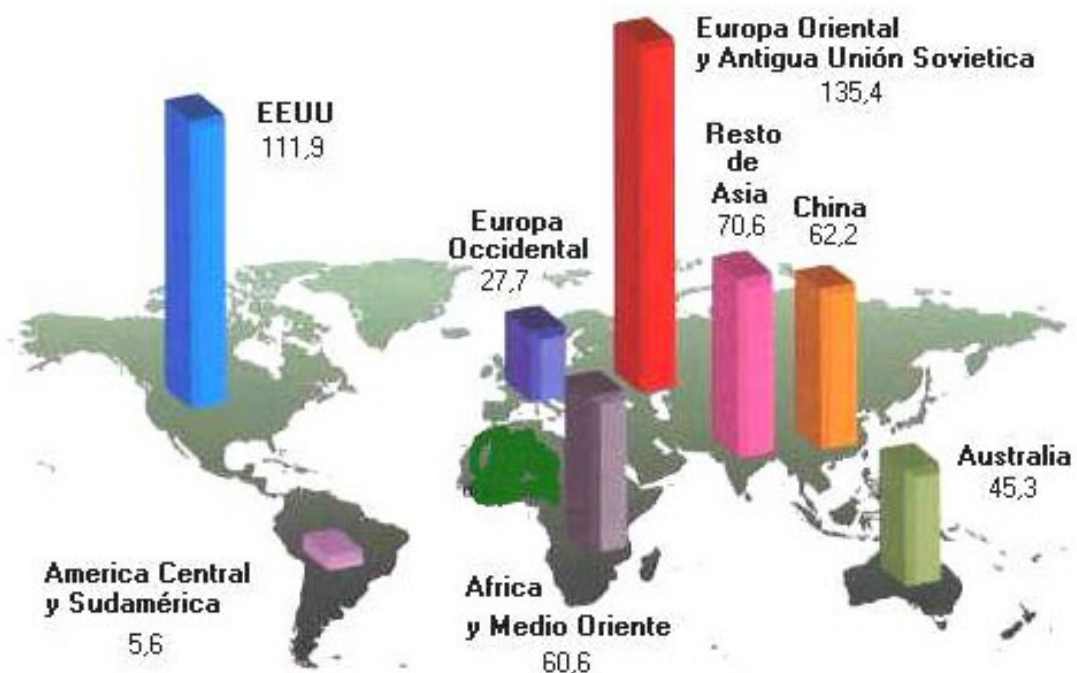


Figura 17: Reservas mundiales de carbón. Figura adaptada de www.catamutun.com

1.3- ENERGÍAS RENOVABLES

Las fuentes de energía renovables han sido el motor de gran parte del crecimiento del sector de la energía limpia global desde el año 2000. Los últimos años han visto una importante ampliación de energía eólica y la energía solar fotovoltaica (PV). Otras tecnologías renovables incluyendo la energía hidroeléctrica, geotérmica y de biomasa continuaron creciendo desde una base establecida fuerte, añadiendo cientos de gigavatios de nueva capacidad en todo el mundo. El éxito de la eólica y la energía solar fotovoltaica ha sido impulsado por el apoyo de políticas, que han hecho que crezca considerablemente en la última década. Políticas que siguen evolucionando para hacer frente a la evolución del mercado y la reducción de costos. En el caso de la energía solar fotovoltaica, por lo menos diez países tienen mercados internos importantes. La generación de energía solar fotovoltaica en la azotea han visto una importante ampliación en los últimos años, como resultado de las políticas de creación de mercado que llevaron a una caída extraordinaria en el coste de los módulos fotovoltaicos. La energía eólica también ha experimentado un crecimiento espectacular en la última década, la capacidad mundial instalada a finales de 2011 fue de alrededor de 240 GW, frente a los 18 GW a finales del año 2000.

A pesar de estas buenas noticias, la generación de electricidad renovable en todo el mundo desde el año 1990 creció un promedio de 2,8 % por año, que es menor que el 3% de crecimiento visto en la generación total de electricidad. Mientras que el 19,5% de la electricidad mundial en 1990 fue producida a partir de fuentes renovables, este porcentaje se redujo al 19,3 % en 2009. Esta disminución es principalmente el resultado de un lento crecimiento de la principal fuente renovable, energía hidroeléctrica, en los países de la OCDE. El logro de la meta de reducir a la mitad las emisiones mundiales de CO₂ relacionadas con la energía para el año 2050 habrá que duplicar (de los niveles actuales) de generación de energía renovable para el año 2020.

1.3.1. EÓLICA

En la actualidad, la energía eólica es utilizada principalmente para producir energía eléctrica mediante aerogeneradores. A finales de 2012 según la AIE, la capacidad mundial de los generadores eólicos fue de 238 gigavatios.

En 2011 la eólica generó alrededor del 3% del consumo de electricidad mundial. La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión.

Los vientos son generados a causa del calentamiento no uniforme de la superficie terrestre por parte de la radiación solar, entre el 1 y 2 % de la energía proveniente del sol se convierte en viento. De día, las masas de aire sobre los océanos, los mares y los

lagos se mantienen frías con relación a las áreas vecinas situadas sobre las masas continentales.

Los continentes absorben una menor cantidad de luz solar, por lo tanto el aire que se encuentra sobre la tierra se expande, y se hace por lo tanto más liviana y se eleva. El aire más frío y más pesado que proviene de los mares, océanos y grandes lagos se pone en movimiento para ocupar el lugar dejado por el aire caliente.

Para poder aprovechar la energía eólica es importante conocer las variaciones diurnas y nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo, la entidad de las ráfagas en espacios de tiempo breves, y valores máximos ocurridos en series históricas de datos con una duración mínima de 20 años. Es también importante conocer la velocidad máxima del viento. Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que este alcance una velocidad mínima que depende del aerogenerador que se vaya a utilizar pero que suele empezar entre los 3 m/s (10 km/h) y los 4 m/s (14,4 km/h), velocidad llamada "cut-in speed", y que no supere los 25 m/s (90 km/h), velocidad llamada "cut-out speed".

La energía del viento es utilizada mediante el uso de máquinas eólicas (o aeromotores) capaces de transformar la energía eólica en energía mecánica de rotación utilizable, ya sea para accionar directamente las máquinas operatrices, como para la producción de energía eléctrica. En este último caso, el sistema de conversión, (que comprende un generador eléctrico con sus sistemas de control y de conexión a la red) es conocido como aerogenerador. En la actualidad se utiliza, sobre todo, para mover aerogeneradores, como los de la foto.

□

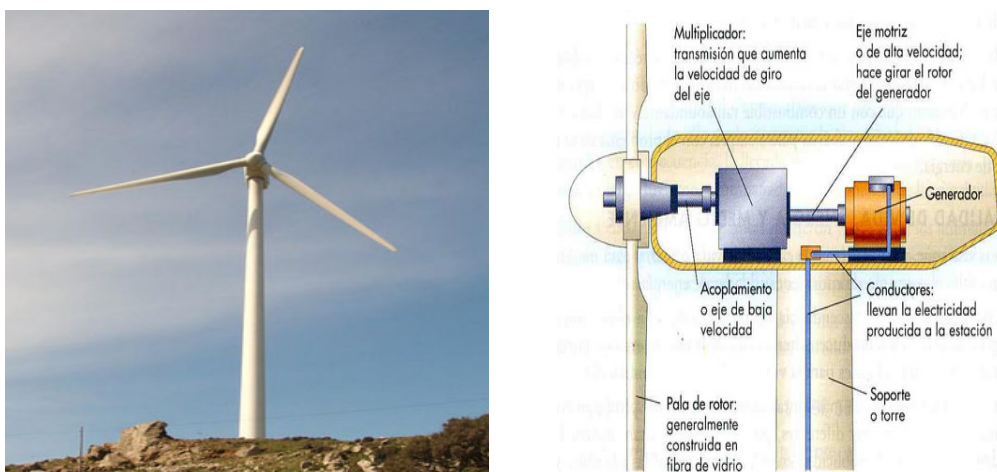


Figura 18: Molino Eólico. Figura adaptada de www.fuenteelfresno.com

En estos la energía eólica mueve una hélice y mediante un sistema mecánico se hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador, que produce energía eléctrica. Para que su instalación resulte rentable, suelen agruparse en concentraciones denominadas parques eólicos.

Un molino es una máquina que transforma el viento en energía aprovechable, que proviene de la acción de la fuerza del viento sobre unas aspas oblicuas unidas a un eje común. El eje giratorio puede conectarse a varios tipos de maquinaria para moler grano, bombear agua o generar electricidad. Cuando el eje se conecta a una carga, como una bomba, recibe el nombre de molino de viento. Si se usa para producir electricidad se le denomina generador de turbina de viento. Los molinos tienen un origen remoto.

La energía eólica no es algo nuevo, es una de las energías más antiguas junto a la energía térmica. El viento como fuerza motriz existe desde la antigüedad y en todos los tiempos ha sido utilizado como tal, como podemos observar. Tiene su origen en el sol. Así, ha movido a barcos impulsados por velas o ha hecho funcionar la maquinaria de los molinos al mover sus aspas. Pero, fue a partir de los ochenta del siglo pasado, cuando este tipo de energía limpia sufrió un verdadero impulso. La energía eólica crece de forma imparable a partir del siglo XXI, en algunos países más que en otros, pero sin duda alguna en España existe un gran crecimiento, siendo uno de los primeros países por debajo de Alemania a nivel europeo o de Estados Unidos a escala mundial.

Su auge en parques eólicos es debido a las condiciones tan favorables que existe de viento, sobre todo en Andalucía que ocupa un puesto principal, entre los que se puede destacar el Golfo de Cádiz, ya que el recurso de viento es excepcional.

□



Figura 19: Parque Eólico Cádiz. Figura adaptada de www.objetivocadiz.lavozdigital.es

□

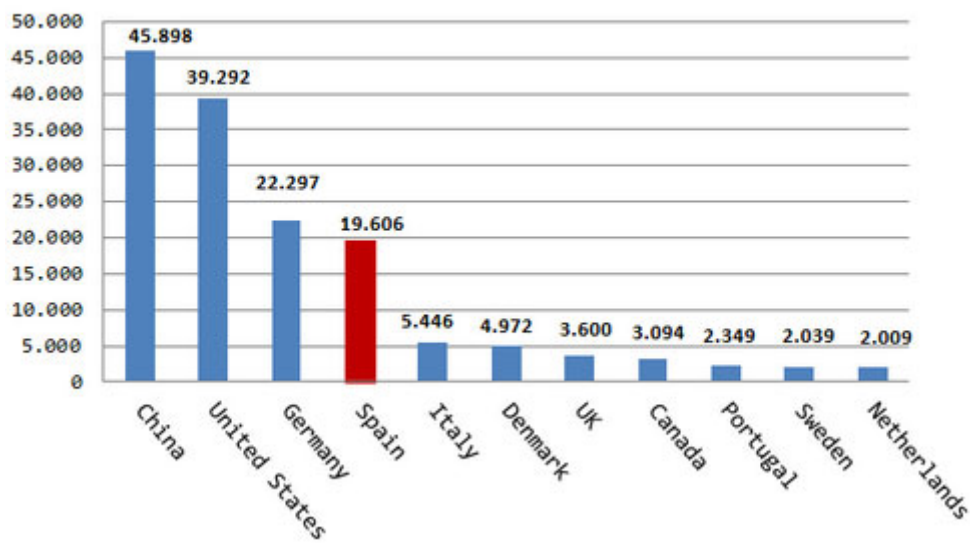


Figura 20: Numero de molinos eólicos año 2011. Figura adaptada de <http://www.elcaptor.com/2012/09/graficos-sector-eolico-mundial.html>

□

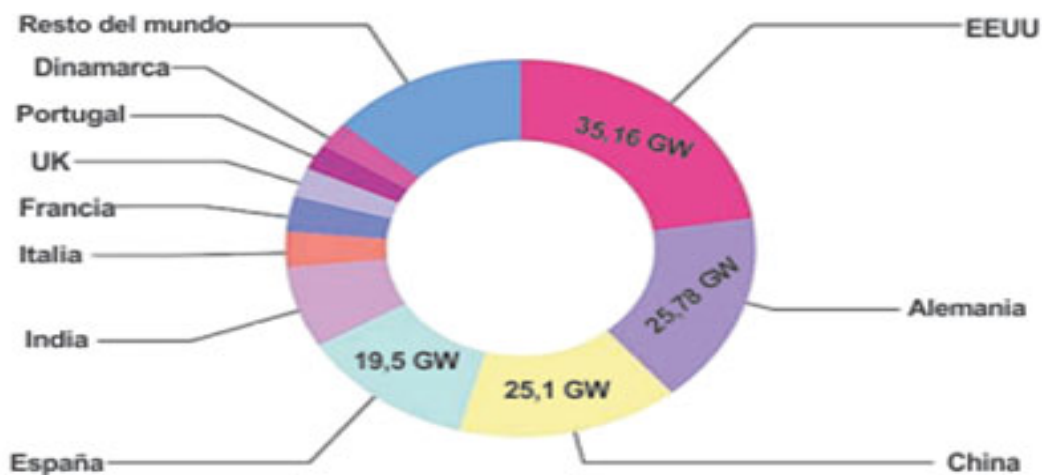


Figura 21: Países productores de energía eólica y su aportación mundial. Figura adaptada de www.monografias.com

1.3.2. GEOTERMIA

La energía geotérmica es, en su más amplio sentido, la energía calorífica que la Tierra transmite desde sus capas internas hacia la parte más externa de la corteza terrestre, para que esa energía pueda ser aprovechada se necesita que se acumule en algún cuerpo del interior de la corteza. La forma más común de concentración es en el agua que rellena los poros y huecos de las formaciones rocosas que constituyen la litosfera y actúa como captador y transmisor de la energía geotérmica.

El agua contenida en la “esponja” que constituyen ciertos materiales geológicos permeables, adquiere los niveles energéticos (temperatura y presión) que la energía proveniente del interior del globo le transfiere.

Como consecuencia de las condiciones termodinámicas del sistema agua-roca, el agua adquiere características químicas específicas determinadas por el equilibrio físico-químico que se produce en el interior de la litosfera, enriqueciéndose en sales minerales provenientes de la disolución del esqueleto rocoso que le alberga.

De esta forma, el fluido geotérmico agua cargada en sales minerales en condiciones de presión y temperatura adecuadas, sirve de vehículo para el aprovechamiento de la energía proveniente del subsuelo.

□

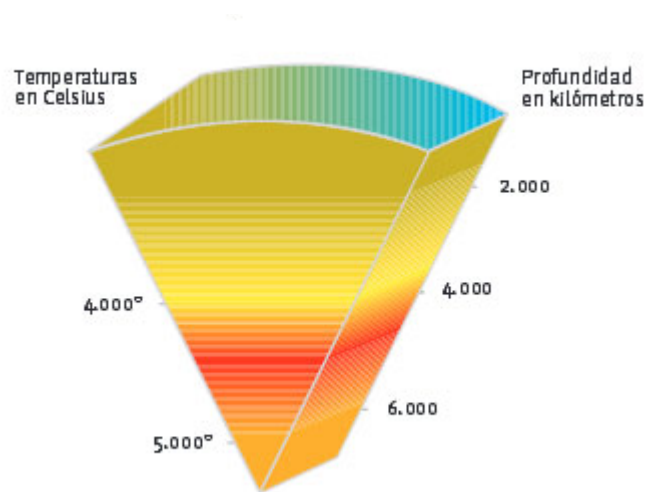


Figura 22: Temperaturas de la tierra según su profundidad. Figura adaptada de www.teinteresasaber.com

Las condiciones clásicas para la existencia de un yacimiento geotérmico son la presencia de:

- un foco de calor activo.
- un material permeable con su base impermeable (el almacén geotérmico) por el que circula un fluido (en general agua de origen meteórica, en fase líquida o vapor).
- una cobertera o sello que impida (o al menos limite) el escape del fluido.

Para aprovechar este calor de las rocas superficiales se han diseñado diversos esquemas basados en los cimientos verticales de edificaciones, en sondeos verticales específicamente realizados al efecto, en bucles horizontales situados a poca profundidad o en losas de cimentación, etc.

En todos estos diseños se utiliza un circuito cerrado del fluido que se hace circular hasta la bomba de calor en la que cede su energía calorífica, a diferencia de los diseños basados en aguas subterráneas que utilizan circuitos abiertos.

□

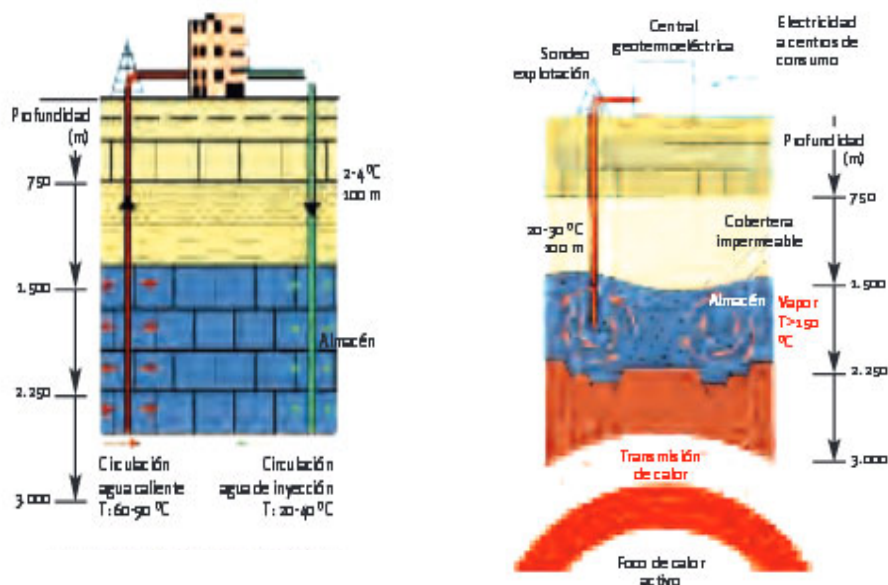


Figura 23: Yacimiento geotérmica de baja temperatura (dcha) y alta temperatura (izqda).

Figura adaptada de <http://tecnoblogsanmartin.wordpress.com>

El Problema que podemos encontrar en la utilización de esta energía es que conlleva una alta inversión y una rentabilidad muy baja, por lo que como podemos comprobar en las siguientes graficas su uso a nivel mundial ha tenido un crecimiento bastante lineal, a diferencia del resto de energías renovables.

En la siguiente tabla se presenta la evolución, desde el año 1980, de la potencia mundial instalada de origen geotérmico para producción de electricidad y el incremento evolutivo a lo largo de estos años. Se puede observar que, durante el periodo 2005-2007, la potencia ha aumentado alrededor de 820 MW, siguiendo un incremento lineal de aproximadamente entre 200 y 250 MWe por año.

□

Año	Potencia instalada (MW)	Intervalo	Aumento (%)
1980	3.887	1980-1985	22,6
1985	4.764	1985-1990	22,4
1990	5.832	1990-1995	17,2
1995	6.833	1995-2000	16,7
2000	7.974	2000-2005	42,9
2005	8.932	2005-2007	9,0
2007	9.737		

Tabla 5: Incremento de potencia instalada de energía geotérmica a nivel mundial. Figura adaptada de www.energeticafutura.com

□

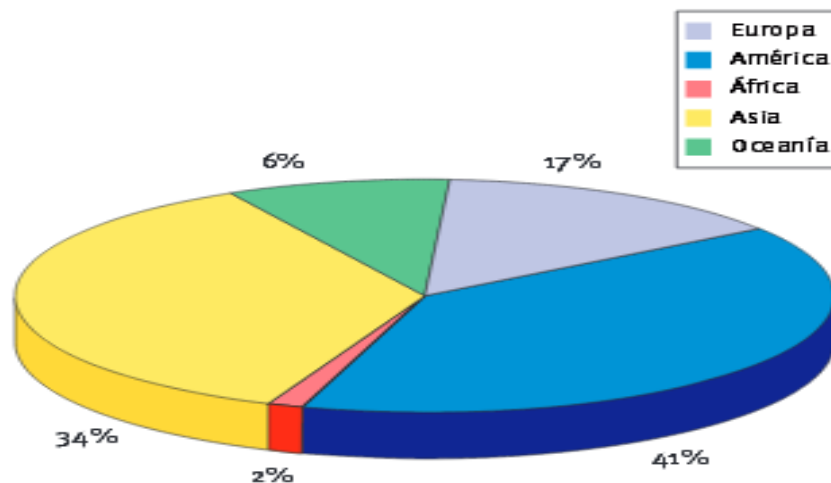


Figura 24: Distribución de potencia geotérmica instalada en el mundo. Figura adaptada de web.ing.puc.cl

1.3.3 ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

En una central hidroeléctrica se utiliza energía hidráulica para la eléctrica. En general, estas centrales aprovechan la energía potencial gravitatoria que posee la masa de agua de un cauce natural en virtud de un desnivel, también conocido como salto geodésico. El agua en su caída entre dos niveles del cauce se hace pasar por una turbina hidráulica la cual transmite la energía a un generador donde se transforma en energía eléctrica.

La potencia de una central puede variar desde unos pocos MW (megavatios), como en el caso de las mini centrales hidroeléctricas, hasta decenas de miles, como en los casos de la Itaipú, entre Brasil y Paraguay, que tiene una potencia de 14 000 MW, o la Presa de las Tres Gargantas, en China, con una potencia de 22 500 MW.

Las centrales hidroeléctricas y las centrales térmicas —que usan combustibles fósiles— producen la energía eléctrica de una manera muy similar. En ambos casos la fuente de energía es usada para impulsar una turbina que hace girar un generador eléctrico, que es el que produce la electricidad. Una central térmica usa calor para, a partir de agua, producir el vapor que acciona las paletas de la turbina, en contraste con la planta hidroeléctrica, la cual usa la fuerza del agua directamente para accionar la turbina.

En la foto tenemos la presa de Itapu que la presa individual que mas energía produce en el mundo.

□



Figura 27: Presa de Itapu entre Paraguay y Brasil. Figura adaptada de es.wikipedia.org

Presa de las tres gargantas en China, es la central hidráulica más grande del mundo.

□



Figura 28: Presa de las tres gargantas en China. Figura adaptada de es.wikipedia.org

Según su concepción arquitectónica podemos tener varios tipos de presas:

- Centrales al aire libre, al pie de la presa, o relativamente alejadas de esta. Están conectadas por medio de una tubería en presión.
- Centrales en caverna, generalmente conectadas al embalse por medio de túneles, tuberías en presión, o por la combinación de ambas.

Según su régimen de flujo podemos tener los siguientes tipos de presas:

- Centrales de agua fluyente. También denominadas centrales de filo de agua o de pasada, utilizan parte del flujo de un río para generar energía eléctrica. Operan en forma continua porque no tienen capacidad para almacenar agua, no disponen de embalse. Turbinan el agua disponible en el momento, limitadamente a la capacidad instalada. En estos casos las turbinas pueden ser de eje vertical, cuando el río tiene una pendiente fuerte u horizontal cuando la pendiente del río es baja.
- Centrales de embalse. Es el tipo más frecuente de central hidroeléctrica. Utilizan un embalse para reservar agua e ir graduando el agua que pasa por la turbina. Es posible generar energía durante todo el año si se dispone de reservas suficientes. Requieren una inversión mayor.

- Centrales de regulación. Almacenamiento del agua que fluye del río capaz de cubrir horas de consumo.
- Centrales de bombeo o reversibles. Una central hidroeléctrica reversible es una central hidroeléctrica que además de poder transformar la energía potencial del agua en electricidad, tiene la capacidad de hacerlo a la inversa, es decir, aumentar la energía potencial del agua (por ejemplo subiéndola a un embalse) consumiendo para ello energía eléctrica. De esta manera puede utilizarse como un método de almacenamiento de energía (una especie de batería gigante). Están concebidas para satisfacer la demanda energética en horas pico y almacenar energía en horas valle.

Aunque lo habitual es que estas centrales turbinen/bombeen el agua entre dos embalses a distinta altura, existe un caso particular llamado centrales de bombeo puro donde el embalse superior se sustituye por un gran depósito cuya única aportación de agua es la que se bombea del embalse inferior.

Según su altura de caída del agua tenemos las siguientes:

- Centrales de alta presión. Que corresponden con alta caída, y que son las centrales de más de 200 m de caída del agua, por lo que solía corresponder con centrales con turbinas Pelton.
- Centrales de media presión. Son las centrales con caída del agua de 20 a 200 m, siendo dominante el uso de turbinas Francis, aunque también se puedan usar Kaplan.
- Centrales de baja presión. Que corresponden con baja caída, son centrales con desniveles de agua de menos de 20 m, siendo usadas las turbinas Kaplan.
- Centrales de muy baja presión. Son centrales correspondientes con nuevas tecnologías, pues llega un momento en el cual las turbinas Kaplan no son aptas para tan poco desnivel. Serían en inglés las very low head, y suelen situarse por debajo de los 4m.

□

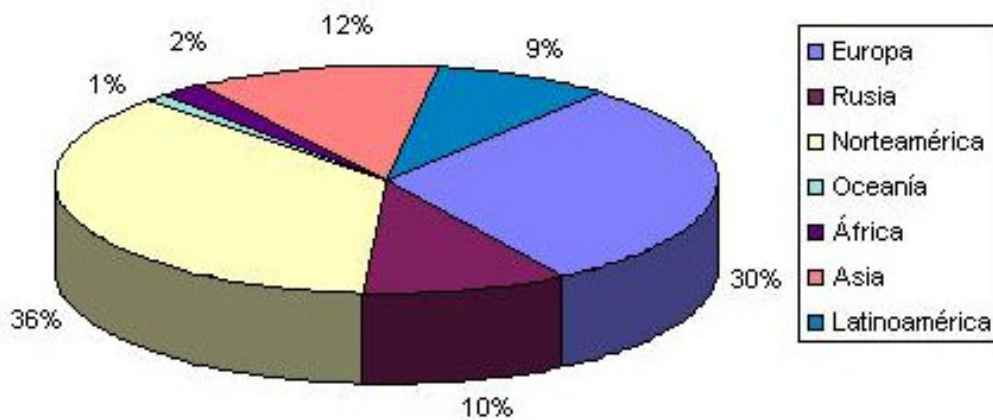


Figura 29: Generación de energía hidroeléctrica mundial. Figura adaptada de www.exterior.pntic.mec.es

De todo lo expuesto anteriormente tenemos que saber que la energía hidráulica es la fuente renovable de electricidad más importante y más utilizada en el mundo. Representa un 19% de la producción total de electricidad, siendo Canadá el productor más importante de energía hidroeléctrica, seguido por los Estados Unidos y Brasil.

Aproximadamente dos tercios del potencial hidroeléctrico económicamente viable quedan aún por desarrollar. La energía hidráulica no aprovechada es todavía muy abundante en América Latina, África central, India.

La energía hidráulica tiene la cualidad de ser renovable, pues no agota la fuente primaria al explotarla, y es limpia, ya que no produce en su explotación sustancias contaminantes de ningún tipo. Sin embargo, el impacto medioambiental de las grandes presas, por la severa alteración del paisaje e, incluso, la inducción de un microclima diferenciado en su emplazamiento, ha desmerecido la bondad ecológica de este concepto pero al mismo tiempo, la madurez de la explotación hace que en los países desarrollados no queden apenas ubicaciones atractivas por desarrollar nuevas centrales hidroeléctricas, por lo que esta fuente de energía, que aporta una cantidad significativa de la energía eléctrica en muchos países (en España, según los años, puede alcanzar el 30%) no permite un desarrollo adicional excesivo. Recientemente se están realizando centrales mini hidroeléctricas, mucho más respetuosas con el ambiente y que se benefician de los progresos tecnológicos, logrando un rendimiento y una viabilidad económica razonables.

1.3.4 ENERGÍA MAREOMOTRIZ

La energía mareomotriz se produce gracias al movimiento generado por las mareas, esta energía es aprovechada por turbinas, las cuales a su vez mueven la mecánica de un alternador que genera energía eléctrica, finalmente este último está conectado con una central en tierra que distribuye la energía hacia la comunidad y las industrias.

El funcionamiento de una planta mareomotriz, es sencillo, cuando se eleva la marea se abren las compuertas del dique la cual ingresa en el embalse. Después cuando llega a su nivel máximo el embalse, se cierran las compuertas. Después, cuando la marea desciende por debajo del nivel del embalse alcanzando su amplitud máxima entre este y el mar se abren las compuertas dejando pasar el agua por las turbinas a través de los estrechos conductos.

Existen tres métodos de generación:

- **Generador de la corriente de marea:** Los generadores de corriente de marea hacen uso de la energía cinética del agua en movimiento a las turbinas de la energía, de manera similar al viento (aire en movimiento) que utilizan las turbinas eólicas. Este método está ganando popularidad debido a costos más bajos y a un menor impacto ecológico en comparación con las presas de marea.

□

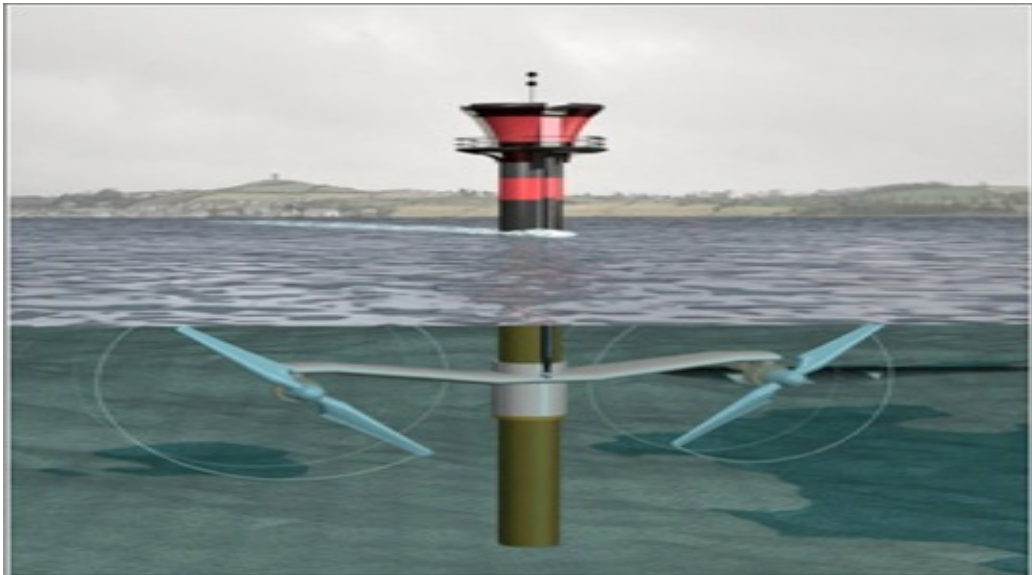


Figura 30: Ilustración del funcionamiento de la energía mareomotriz. Figura adaptada de marejerefran.blogspot.com

- Presa de marea: Las presas de marea hacen uso de la energía potencial que existe en la diferencia de altura (o pérdida de carga) entre las mareas altas y bajas. Las presas son esencialmente los diques en todo el ancho de un estuario, y sufren los altos costes de la infraestructura civil, la escasez mundial de sitios viables y las cuestiones ambientales.

□

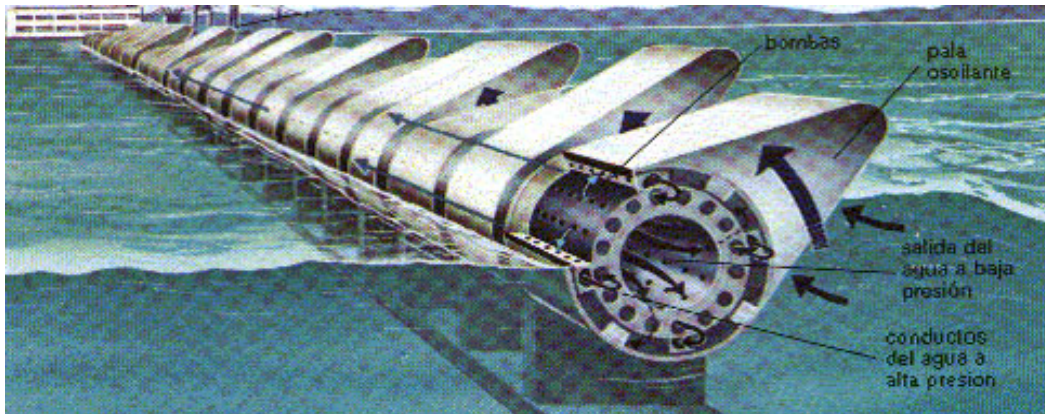


Figura 31: Ilustración del funcionamiento de una presa de marea. Figura adaptada de chointecnologia.wikispaces.com

- Energía mareomotriz dinámica: La energía mareomotriz dinámica es una tecnología de generación teórica que explota la interacción entre las energías cinética y potencial en las corrientes de marea. Se propone que las presas muy largas (por ejemplo: 30 a 50 km de longitud) se construyan desde las costas hacia afuera en el mar o el océano, sin encerrar un área. Se introducen por la presa diferencias de fase de mareas, lo que lleva a un diferencial de nivel de agua importante (por lo menos 2.3 metros) en aguas marinas ribereñas poco profundas con corrientes de mareas que oscilan paralelas a la costa, como las que encontramos en el Reino Unido, China y Corea. Cada represa genera energía en una escala de 6 a 17 GW.

Es una energía con un alto coste en inversión y muy bajo rendimiento por lo que aporta muy poco a la red eléctrica y debido a que la instalación de una central mareomotriz en el mundo es solo posible en lugares de al menos una diferencia de 5 metros entre la marea alta y la baja hay pocos puntos en el planeta donde puede ocurrir esto, la foto de abajo nos indica los principales.

□

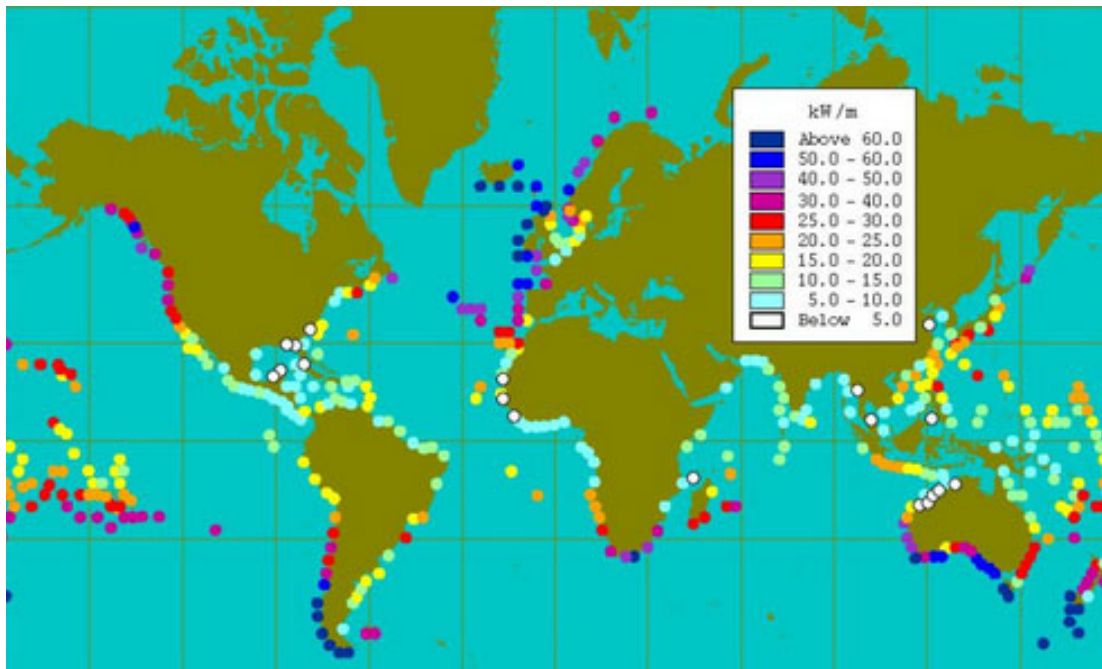


Figura 32: Mapa de las centrales mareomotrices en el mundo. Figura adaptada de web.ing.puc.cl

1.3.5 BIOCOMBUSTIBLES

Un biocarburante o biocombustible es una mezcla de hidrocarburos que se utiliza como combustible en los motores de combustión interna. Deriva de la biomasa, materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

Para la obtención de los biocarburantes se pueden utilizar especies de uso agrícola tales como el maíz o la mandioca, ricas en carbohidratos, o plantas oleaginosas como la soja, girasol y palmas. También se pueden emplear especies forestales como el eucalipto y los pinos.

En Europa, Argentina y Estados Unidos ha surgido diversa normativa que exige a los proveedores mezclar biocombustibles hasta un nivel determinado. Generalmente los biocombustibles se mezclan con otros combustibles en cantidades que varían del 5 al 10%.

Los combustibles de origen biológico pueden sustituir parte del consumo en combustibles fósiles tradicionales, como el petróleo o el carbón.

Los biocarburantes más usados y desarrollados son el bioetanol y el biodiesel.

- El bioetanol, también llamado etanol de biomasa, por fermentación alcohólica de azúcares de diversas plantas como la caña de azúcar, remolacha o cereales . En 2006, Estados Unidos fue el principal productor de bioetanol (36% de la producción mundial), Brasil representa el 33,3%, China el 7,5%, la India el 3,7%, Francia el 1,9% y Alemania el 1,5%. La producción total de 2006 alcanzó 55 mil millones de litros.
- El biodiesel, se fabrica a partir de aceites vegetales, que pueden ser ya usados o sin usar.³ En este último caso se suele usar colza, canola, soja o jatrofa, los cuales son cultivados para este propósito. El principal productor de biodiesel en el mundo es Alemania, que concentra el 63% de la producción. Le sigue Francia con el 17%, Estados Unidos con el 10%, Italia con el 7% y Austria con el 3%.
- Biodiesel: Es el biocombustible más común en Europa. Éste es producido por aceites o grasas usando el proceso de transesterificación y su composición líquida es muy similar a la del diesel fósil/mineral. Químicamente, consiste en su mayoría de esteres metílicos de ácido grasos. Sus principales materias primas incluyen grasas de animales, aceites vegetales, soja, jaropa, semilla de colza, mahua, mostaza, lino, girasol, aceite de palma, marihuana, algas, entre otras. El biodiesel puro (B100) es el combustible diesel de menor emisión.

□

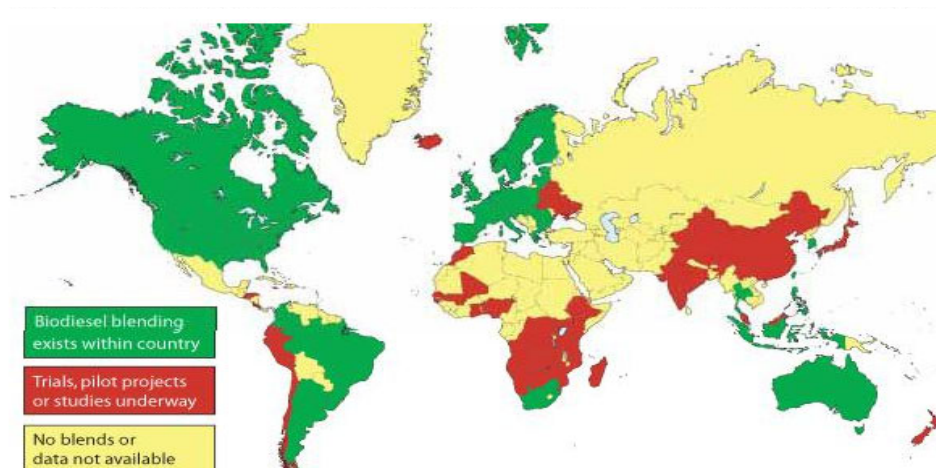


Figura 33: Grafica de la demanda biocombustible a nivel mundial. Fotografía adaptada de nmrlab.yo-que.ch

□

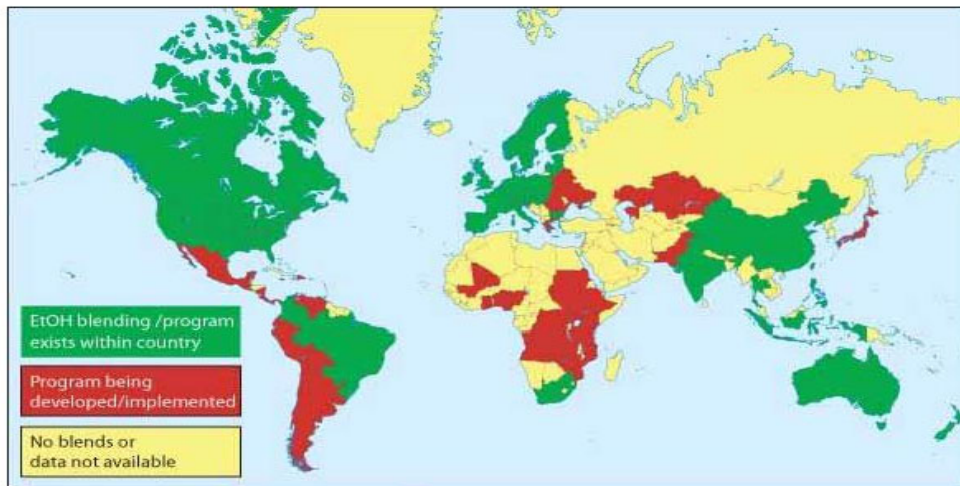


Figura 34: Uso actual del biodiesel. Fotografía adaptada de nmrlab.yo-que.ch

1.3.6 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Aunque es un tema del que tratare especialmente en el siguiente tema hare una pequeña introducción sobre la historia, primeros uso y de los aspectos mas relevantes de esta energía.

La energía solar fotovoltaica es un tipo de electricidad renovable obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica, o una deposición de metales sobre un sustrato llamado célula solar de película fina.

Este tipo de energía se usa para alimentar innumerables aparatos autónomos, para abastecer refugios o casas aisladas de la red eléctrica y para producir electricidad a gran escala a través de redes de distribución. Debido a la creciente demanda de energías renovables, la fabricación de células solares e instalaciones fotovoltaicas ha avanzado considerablemente en los últimos años.

Entre los años 2001 y 2012 se ha producido un crecimiento exponencial de la producción de energía fotovoltaica, doblándose aproximadamente cada dos años. La potencia total fotovoltaica instalada en el mundo (conectada a red) ascendía a 7,6 GW en 2007, 16 GW en 2008, 23 GW en 2009, 40 GW in 2010 y 70 GW en 2011.

A finales de 2012, se habían instalado en todo el mundo más de 100 GW de potencia fotovoltaica. Gracias a ello la energía solar fotovoltaica es actualmente, después de las energías hidroeléctrica y eólica, la tercera fuente de energía renovable más importante en términos de capacidad instalada a nivel global, y supone ya una fracción significativa

del mix eléctrico en la Unión Europea, cubriendo de media el 3-5% de la demanda y hasta el 10% en los períodos de mayor producción, en países como Alemania, Italia o España. La producción de energía eléctrica generada por la fotovoltaica a nivel mundial equivale a cerca de 110.000 millones de kWh de electricidad, suficiente para cubrir las necesidades energéticas de más de 20 millones de hogares,¹⁵ y representa actualmente un 0,5% de la demanda mundial de electricidad.

Gracias a los avances tecnológicos, la sofisticación y la economía de escala, el coste de la energía solar fotovoltaica se ha reducido de forma constante desde que se fabricaron las primeras células solares comerciales, aumentando a su vez la eficiencia, y logrando que su coste medio de generación eléctrica sea ya competitivo con las fuentes de energía convencionales en un creciente número de regiones geográficas, alcanzando la paridad de red. Programas de incentivos económicos, primero, y posteriormente sistemas de autoconsumo fotovoltaico y balance neto sin subsidios, han apoyado la instalación de la fotovoltaica en un gran número de países, contribuyendo a evitar la emisión de una mayor cantidad de gases de efecto invernadero.

La tasa de retorno energético de esta tecnología, por su parte, es cada vez mayor. Con la tecnología actual, los paneles fotovoltaicos recuperan la energía necesaria para su fabricación en un período comprendido entre 6 meses y 1,4 años; teniendo en cuenta que su vida útil media es superior a 30 años, producen electricidad limpia durante más del 95% de su ciclo de vida.

□



Figura 35: Placas solares Fotovoltaicas. Figura adaptada de huelvabuenasnoticias.com

□

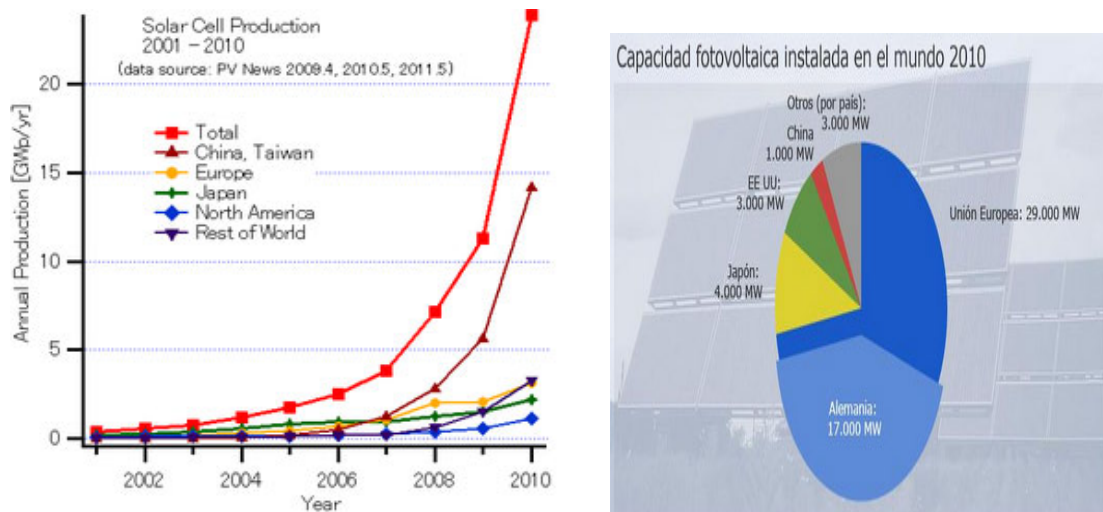


Figura 36: Capacidad Fotovoltaica instalada en el mundo. Fotografía adaptada de www.evwind.com

Aquí podemos ver como ha aumentado la producción de energía solar fotovoltaica en el mundo siendo China el país que mas ha invertido.

1.4- CONCLUSIONES TEMA 1

En este tema hemos descrito los siguientes puntos:

- Hemos empezado describiendo la situación energética mundial en el uso de los diferentes tipos de fuentes de energía, analizando como países denominados primer mundo están cambiando su uso en energía alternativa y viendo como los países emergentes están contribuyendo a un desequilibrio en la balanza mundial.
- Hemos continuado analizando los diferentes tipos de energía limitada a nivel mundial, su uso por regiones y haciendo una valoración de lo que queda de esta energía no renovable en cuanto a reservas mundiales.
- Hemos continuado explicando los diferentes tipos de energías renovables, analizando su incremento a nivel mundial por regiones y comprobando como cada vez aportan mas electricidad a la red eléctrica.
- Con todo lo expuesto anteriormente hemos hecho una primera introducción de energía solar fotovoltaica que es de lo que trataremos en el siguiente tema.

TEMA 2 – ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.1- INTRODUCCION

En este tema vamos a describir como funcionan internamente las placas solares fotovoltaicas, que es de lo que trata este proyecto. Empezaremos describiendo su funcionamiento desde que es irradiada hasta que nos entregue su máxima potencia, pasando por como le afecta la influencia de la temperatura. Aprovecharemos para explicar los diferentes tipos de instalaciones que existen.

2.2- ILUMINACIÓN DE CRISTALES DE SILICIO

Partimos de la base de que los cristales son cuerpos sólidos cuyos átomos se encuentran dispuestos en el espacio de forma ordenada y repetitiva siendo precisamente esta disposición regular lo que les confiere sus propiedades especiales. Lo que necesitamos saber es que si el cristal es puro, es decir, si está formado por átomos de un solo elemento cada uno de estos puede entenderse como constituidos por una carga eléctrica negativa asociada a otra positiva, que denominaremos electrón y hueco respectivamente.

Cuando un cristal esta en reposo, básicamente cuando está en oscuridad y a una temperatura de 0K, todas las cargas eléctricas que constituyen sus átomos están enlazadas entre si, es decir cada electrón esta enlazado con su hueco, y ambos están fijos en la posición que ocupa su átomo correspondiente en la red cristalina. En esta situación, por tanto, no hay cargas eléctricas libres dentro del cristal, y este nos puede conducir corriente eléctrica. En consecuencia, un cristal en reposo se comporta como un aislante perfecto. Pero si por el contrario a ese cristal que se encuentra en reposo le hacemos un aporte de energía podemos lograr romper el enlace de algunos átomos originando la aparición de electrones y huecos que pueden moverse libremente por el mismo y que, en su condición de cargas eléctricas permiten conducir corriente eléctrica. Por lo tanto un cristal energizado se aproxima a un conductor.

Una forma de energizar un cristal es iluminarlo, la luz está formada por fotones que funcionan como paquetes de energía que pueden ser absorbidos por los átomos del cristal. Más concretamente, la cantidad de energía que contiene un fotón depende de su color, y cada color esta asociado a un valor determinado de la longitud de onda λ , o de la frecuencia, f , de la radiación correspondiente. La energía de un fotón, E viene dada por la llamada relación de Einstein, $E = h f$, donde h es la llamada constante de Planck ($4,136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$). Además, el producto λf es igual a la velocidad de la luz, c ($3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), por lo que también $E = hc \lambda^{-1}$, donde $hc = 1240 \text{ eV}$.

Con esta relación, es inmediato ver que la energía de cualquier fotón con $\lambda=1100\text{nm}$ es igual o superior a 1,12 eV.

En condiciones ideales la intensidad de la luz solar, o irradiancia en la superficie de la Tierra es de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, que se reparten por diversos colores.

En realidad el aprovechamiento de la energía de los fotones en tales células es mas bien pobre, debido fundamentalmente a que por mucha que sea la energía absorbida al generar un par electrón-hueco, la energía que puede aprovecharse posteriormente esta limitada a un máximo de 0,7 eV. Esto se debe a la física de los semiconductores que hasta toparse con los llamados pseudo-niveles de Fermi, este fenómeno nos hace perder casi el 75% del total de la energía de los fotones absorbidos, lo que rebaja el límite de la eficiencia alcanzable con células de silicio a un máximo del 28%. La mejor célula hecha en un laboratorio llega a una eficiencia del 25%, que representa el 90% del valor ideal, e indica el mucho dominio que hoy se tiene sobre esta tecnología.

En esta figura podemos ver la radiación solar que llega a la superficie de la tierra según la dirección general de protección civil de España.

□

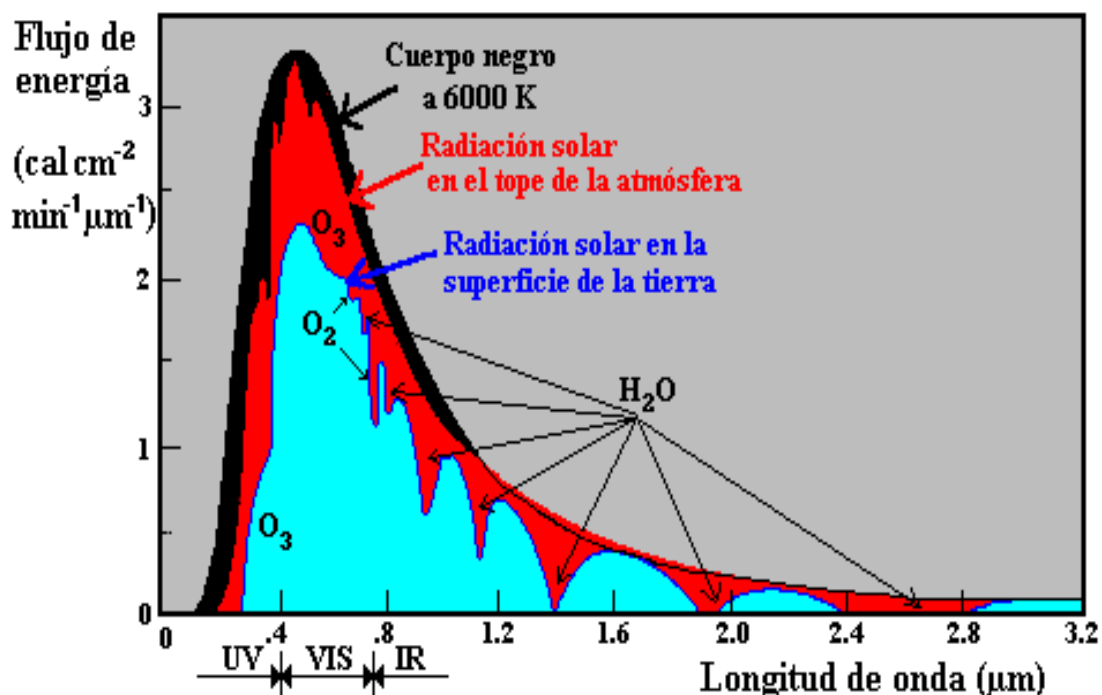


Figura 37: Radiación solar que llega a España. Fotografía adaptada de www.proteccioncivil.org

2.3- EFECTO FOTOVOLTAICO

Los electrones y huecos que se generan en el seno de un cristal iluminado se mueven por su interior de forma aleatoria, entonces cuando un hueco y un electrón se encuentran reconstituyen un enlace y se fija en la posición de un átomo primigenio, liberando una energía igual a E_G , que se manifiesta en forma de calor. Por eso cuando se expone al sol un cristal de silicio se calienta. En un lenguaje mas sistemático, cuando se reconstituye un enlace se habla de recombinación de un par electrón-hueco. El calor resultante de este proceso no tiene utilidad energética práctica, por lo que la recombinación es considerada como un fenómeno indeseado para el funcionamiento de las células solares que los diseñadores tratan de minimizar.

Sin embargo si, por el procedimiento que sea, somos capaces de hacer que exista un campo eléctrico en el interior del cristal, los electrones y huecos se moverán ordenadamente –no aleatoriamente- en la dirección del campo y, debido al signo diferente de sus cargas, en sentido contrario. Así, el campo eléctrico separa los huecos de los electrones, haciendo que ambos tiendan a acumularse en zonas diferentes del cristal, originando de esta forma “excesos” de huecos y electrones que, a su vez, son causa de la aparición de un voltaje entre sus extremos. De esa manera la iluminación hace que el cristal se convierta en un “generador eléctrico”.

Vamos a explicarlo según la siguiente figura con una placa

□

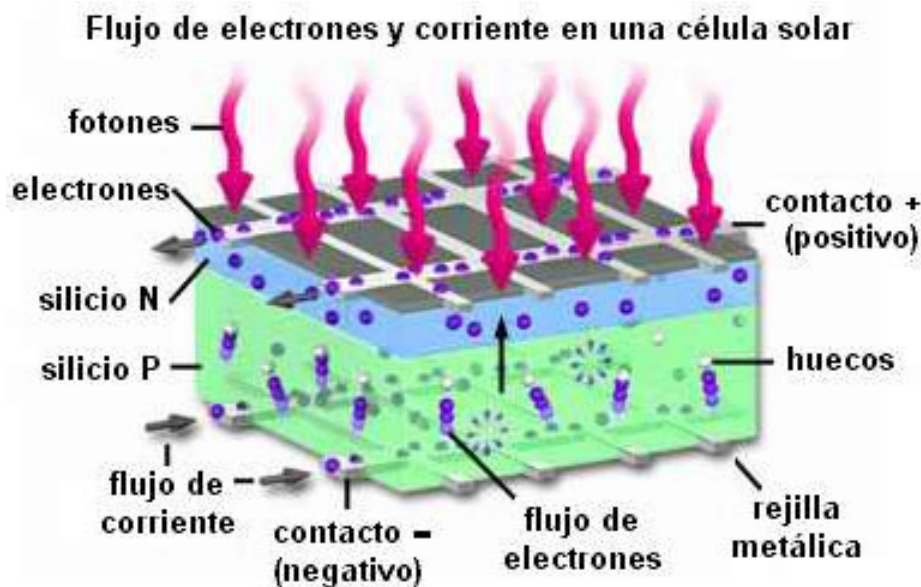


Figura 38: Flujo de electrones y corriente en una célula solar. Fotografía adaptada de granadoangel.blogspot.com

Antes aclararemos unos conceptos básicos sobre la unión PN.

Se produce una difusión de huecos de la región P a la región N y una difusión de electrones de la región N a la región P. Al haber difusión algunos huecos que pasan de la región P a la región N y algunos electrones que pasan de la zona N a la zona P, se recombinan hasta alcanzar el equilibrio.

Si la unión PN, en circuito abierto, se somete a una radiación cuya energía supere la anchura de la banda prohibida, aparecen pares electrón-hueco adicionales que se desplazan bajo la acción del campo eléctrico en la zona de la unión. La llegada de electrones a la zona N y de huecos a la zona P, produce una reducción del potencial de contacto de valor V_P , que se puede medir mediante conexiones externas a una resistencia de carga. Esta tensión aumenta al aumentar la intensidad de la radiación incidente hasta llegar a la saturación. Si se cortocircuitan los contactos la corriente es proporcional a la intensidad luminosa recibida en un amplio margen.

□

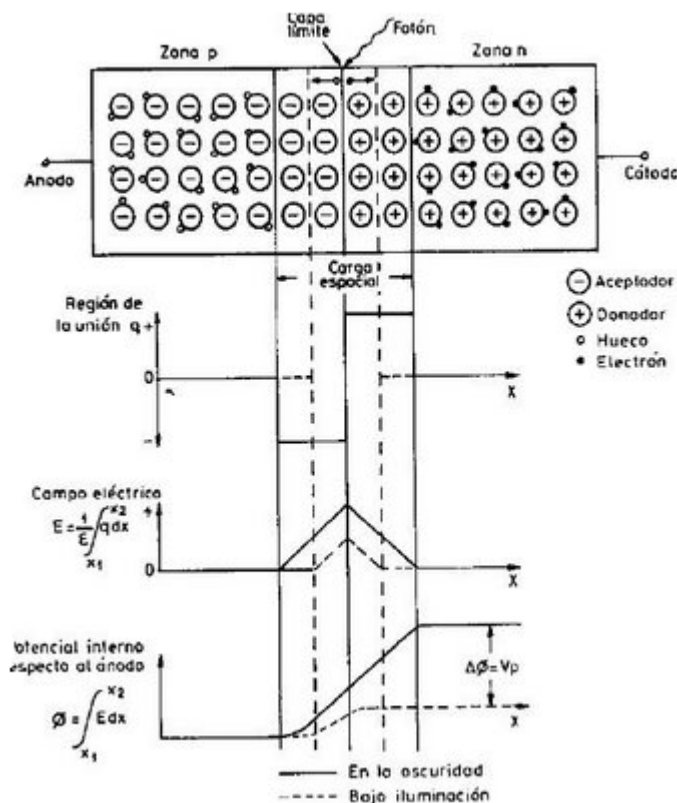


Figura 39: Reacción de una placa a la luz. Fotografía adaptada de www.alipso.com

Un fotodiodo, bajo radiación, genera una corriente en el sentido cátodo-ánodo y una tensión ánodo-cátodo positiva, es decir, se comporta como una fuente de tensión dependiente de la iluminación recibida.

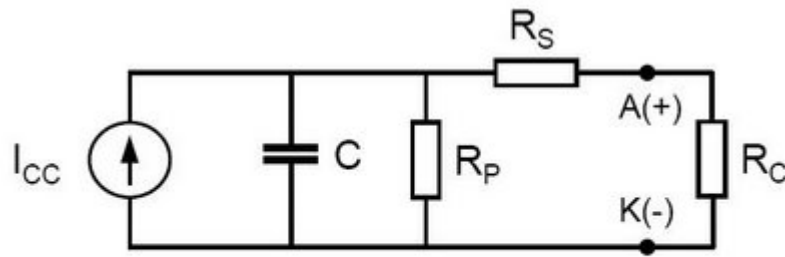


Figura 40: Circuito equivalente sensor fotovoltaico. Fotografía adaptada de Sección Departamental de Electrónica-Física U.P.M

La gama de longitudes de onda a la que es sensible el sensor depende del material semiconductor utilizado. Los sensores fotovoltaicos se emplean tanto en aplicaciones donde se mide la luz como en aplicaciones donde la luz se emplea como medio para detectar otra magnitud. Se comercializan modelos constituidos por un par emisor-detector adaptados, e incluso conectados a un relé para control.

Este campo eléctrico generado en el interior del cristal por las propias cargas que separa el campo original se manifiesta en forma de diferencia de potencial, o voltaje, que aparecen entre los extremos del cristal, y que puede medirse con un voltímetro convencional. Este efecto fotovoltaico se descubrió por primera vez Becquerel en el año 1839.

2.4- CURVA I-V

Teniendo en cuenta la siguiente ecuación: $I = I_L - I_d(V)$, donde sabemos que la corriente eléctrica suministrada por una célula solar a una carga viene dada por la diferencia entre la fotocorriente I_L y la corriente de recombinación o de diodo, $I_d(V)$ debida la polarización producida por el voltaje generado.

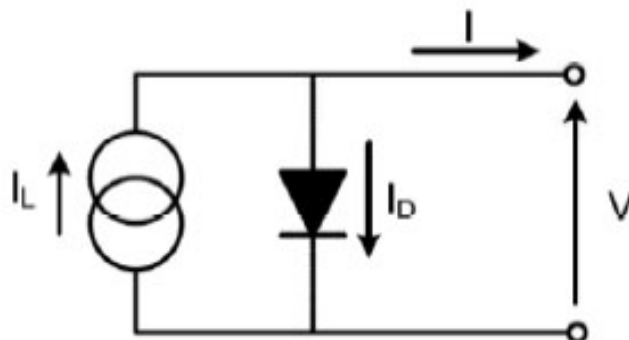


Figura 42: Circuito diodo generador de corriente. Fotografía adaptada de Sección Departamental de Electrónica-Física U.P.M

Considerando para simplificar que la corriente de diodo puede expresarse mediante el modelo de una sola exponencial la ecuación característica de este dispositivo es la siguiente:

$$I(V) = I_l - I_o \left(\exp \left(\frac{V}{mV_t} \right) - 1 \right)$$

$V_t = \frac{KT_c}{e}$, tensión térmica, 25 mv , 300°K= 27 °C

$$V_t(T) = 0,025V * \frac{T_c(^{\circ}K)}{300^{\circ}K}$$

I_o , es la corriente de saturación del diodo

m , es un factor de idealidad correspondido entre $1 < m < 2$.

La característica I-V representada por esta ecuación tiene la siguiente forma estándar que se muestra en la siguiente figura.

□

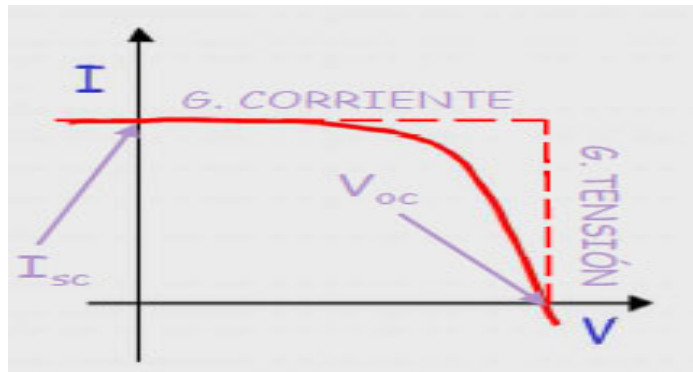


Figura 43: Curva I-V. Fotografía adaptada de Sección Departamental de Electrónica-Física U.P.M

Esta forma de representación adopta el convenio de signos de considerar positivas la corriente de generación (que es el contrario al habitualmente utilizado en los circuitos electrónicos que usan diodos). Con este convenio, el primer cuadrante del plano I-V corresponde al funcionamiento de la célula entregando corriente a una carga bajo tensión positiva; es decir, corresponde al funcionamiento del dispositivo como generador de energía.

2.5- CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO Y TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO

Como puede observarse en la anterior figura, el mayor valor de la corriente en la región se obtiene para condiciones de cortocircuito ($V=0$). Según la ecuación: $I(V) = I_l - I_o \left(\exp \left(\frac{V}{mV_t} \right) - 1 \right)$, la corriente de cortocircuito viene dada por la expresión:

$$I_{sc} \equiv I(V = 0) = I_l$$

Si el dispositivo se mantiene en circuito abierto ($I=0$), este se autopolarizará con una cierta tensión, que es la mayor que puede soportar en la región de generación. Se trata de la tensión de circuito abierto, V_{oc} , y su valor es tal que la fotocorriente queda completamente compensada por la corriente de polarización, esto es, $I_l = I_d(V_{oc})$, en condiciones de circuito abierto y, teniendo en cuenta la ecuación $I(V) = I_l - I_o(\exp(\frac{V}{mV_t}) - 1)$, resulta la siguiente ecuación:

$$V_{oc} = m(Kt_c/e) \ln(\frac{I_l}{I_o} + 1)$$

La definición de los dos parámetros de operación anteriores permite escribir la característica de la célula de la siguiente manera alternativa:

$$I = I_{sc} \{1 - \exp[e(V_{oc} - V)/(mkT_c)]\}$$

que puede resultar de utilidad en determinadas ocasiones. La formula es prácticamente cierta alrededor del circuito abierto, pero su validez para todo el rango de funcionamiento es cuestionable porque los parámetros m e I_o de la ecuación son en general variables con el punto de trabajo.

2.6- PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA

Como ya se ha indicado anteriormente la región de la curva característica comprendida entre I_{sc} y V_{oc} corresponde a la célula como generador.

□

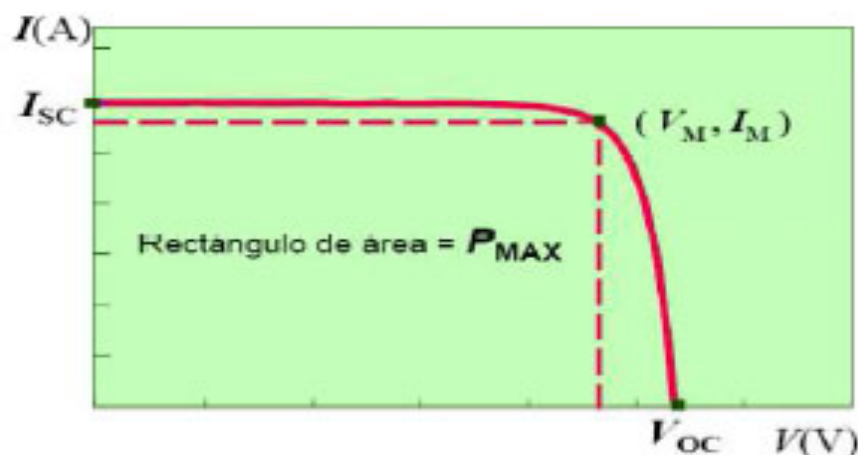


Figura 44: Grafica punto de máxima potencia. Fotografía adaptada de Sección Departamental de Electrónica-Física U.P.M

Si la energía es suministrada a una carga resistiva , como mostramos en la anterior figura, la potencia entregada a la resistencia viene dada por el producto $P = I * V$, y existirá un punto de funcionamiento (I_m, V_m) para el que la potencia entregada sea máxima: es el punto de máxima potencia. Los valores de I_m y V_m pueden obtenerse de la condición de máximo:

$$\frac{dP}{dV} = 0$$

Cuando se aplica a una célula descrita por la ecuación

$$I(V) = I_l - I_o(\exp(\frac{V}{mV_t}) - 1), \text{ resulta que tenemos}$$

$$I_m = (I_l + I_o) / (1 + \frac{mkT_c}{eV_m})$$

Estas ecuaciones forman un sistema del que puede calcularse I_m y V_m . El sistema no tiene, sin embargo, una solución explícita. Una solución analítica muy aproximada es

$$\frac{I_m}{I_l} = 1 - a^{-b} \text{ y } \frac{V_m}{V_{oc}} \cong 1 - (\ln a)/a$$

Donde

$$a = 1 + \ln(I_l/I_o) \text{ y } b = a/(a+1)$$

Para los valores usuales de las células solares prácticas, estas fórmulas predicen valores de I_m próximos a I_l , y valores de V_m próximos a V_{oc} .

2.7- FACTOR DE FORMA Y EFICIENCIA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA

El producto $I_m * V_m$ que da la potencia máxima entregada a la carga, lo representamos con la siguiente figura

□

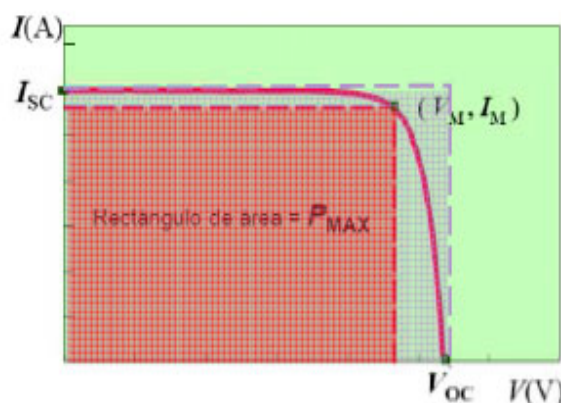


Figura 45: Gráfica de Punto de Máxima Potencia célula solar fotovoltaica. Fotografía adaptada de Sección Departamental de Electrónica-Física U.P.M

Concretamente el área del rectángulo rayado, que es obviamente menor que la del rectángulo que representa el producto de $I_{sc} * V_{oc}$, de la mayor corriente que puede extraerse de la célula, I_{sc} , por la mayor tensión V_{oc} .

Ambos productos se aproximan mas cuanto mas pronunciado sea el codo de la curva característica. Pero, naturalmente, en todos los casos reales el parámetro definido por el cociente es siempre menor que la unidad. Este cociente, llamado factor de forma o factor de llenado, suele utilizarse como cuantificación de la forma de la curva característica:

$$FF = (I_m V_m) / (I_{sc} V_{oc})$$

El factor de forma es un parámetro de gran utilidad práctica, que varia poco de unos dispositivos a otros y que toma valores que se sitúan alrededor de 0,7-0,8 para muchas células de semiconductores cristalinos (Si, GaAs, InP).

Haciendo uso de la definición del factor de forma, la potencia máxima entregada por la célula puede describirse como:

$$P_m = FF * I_{sc} * V_{oc}$$

Esta ecuación realza la dependencia de la potencia máxima respecto de los dos parámetros de funcionamiento básicos que son la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto.

La eficiencia de la conversión de una célula solar se defina como el cociente entre la máxima potencia eléctrica que se puede entregar a la carga y la potencia de la radiación incidente sobre el dispositivo, P_l :

$$\eta \equiv I_m V_m / P_L \equiv FF I_{sc} V_{oc} / P_l$$

Como es lógico, esta eficiencia y la potencia máxima se obtienen únicamente si la resistencia de carga es la adecuada, siendo determinada por V_m / I_m .

2.8- INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y LA IRRADIANCIA

Las primera células que se fabricaron en el pasado estaban pensadas para aplicaciones espaciales. En el espacio las células pueden funcionar en sistemas situados en regiones próximas a la atmosfera terrestre, donde la radiación solar es del orden de 137 mW/cm^{-2} y la célula se encuentra a temperaturas del orden de 50°C o -60°C .

Pero también puede pensarse en aplicaciones en espacios mas lejanos, donde las condiciones de funcionamiento son muy diferentes. Por ejemplo a distancias del Sol del orden de la órbita de Júpiter la temperatura ambiente es del alrededor de -120°C y la radiación incidente solo 5 mW/cm^2 , mientras que a distancias como la orbita de Venus la temperatura excede los 140°C y la intensidad de la radiación alcanza los 250 mW/cm^2 .

La temperatura y la intensidad de la radiación, sin embargo, son también importantes cuando se considera la utilización de las células solares para la generación de electricidad en aplicaciones terrestres. Aparte de las variaciones de temperatura e irradiancia debidas al cambio de condiciones climáticas a lo largo del año, también pueden utilizarse las células en combinación con concentradores ópticos de la radiación que aumentan la intensidad de la luz incidente y, en consecuencia, la temperatura de operación.

Lo que es claro que en todos los ejemplos mencionados es que para diseñar y utilizar adecuadamente las células solares es necesario entender la influencia sobre el comportamiento de las mismas de los dos parámetros de funcionamiento: la temperatura y la intensidad de la radiación.

Con respecto a la Temperatura, partimos considerando una célula descrita por el modelo de una exponencial con $m=1$, lo que corresponde a un comportamiento denominado por las corrientes de recombinación en las zonas neutras, aproximación suficiente en una análisis de primer orden. Además, consideraremos despreciable el efecto de resistencia paralelo.

La ecuación sería la siguiente:

$$I = I_l - I_o(T_c)\{\exp [e(V+IR_s)/(KT_c)] - 1\}$$

La fotocorriente I_l aumenta ligeramente con la temperatura, debido en parte al aumento de las longitudes de difusión de los minoritarios y en parte al estrechamiento de la banda prohibida, que desplaza el umbral de absorción hacia fotones de menor energía. La mejora de la fotocorriente con temperaturas es más acusada en las células de GaAs que en las de Si pero, en todos los casos, la variaciones es pequeña y, y en primera aproximación, I_l puede considerarse independiente de la temperatura.

La variación de las características de la célula con la temperatura se manifiesta, por tanto, de forma explícita en el término exponencial de la ecuación y de forma implícita a través de $I_o(T)$. La dependencia con la temperatura de la corriente inversa de saturación puede escribirse de la siguiente forma:

$$I_o = KT_c^3 \exp\left(-\frac{E_{GO}}{KT_c}\right)$$

Siendo K y E_{GO} (ancho de la banda prohibida a 0K) dos constantes aproximadamente independientes de la temperatura.

Teniendo en cuenta las anteriores dos ecuaciones es inmediato deducir que la tensión de circuito abierto viene dada por

$$V_{oc}(T_c) = (E_{GO}/e) - (KT_c/e) \ln (KT_c^3/I_l)$$

Que predice una disminución de V_{oc} con la temperatura. La importancia de esta variación se aprecia mejor mediante la definición del coeficiente de variación con la temperatura dado por la siguiente expresión:

$$\frac{dV_{oc}}{dT_c} = (1 - T_c)[(E_{GO}/e) - V_{oc}(T_c)]$$

Que sitúa en un valor aproximado de -2,3 mV/ °C para células de silicio a temperatura ambiente.

Por su lado el factor d forma presenta también una disminución con la temperatura, aunque no muy acusada para las temperaturas inferiores a 200°C. El decrecimiento de FF se debe al aumento de I_o y al redondeamiento del codo de la característica I-V, que se produce cuando la temperatura aumenta con la exponencial de la ecuación

$$I = I_l - I_o(T_c)\{\exp [e(V+IR_s)/(KT_c)] - 1\}$$

Como consecuencia de la disminución de V_{oc} y de FF con la temperatura, el ligero aumento de I_l queda mas que compensado y, en definitiva, la eficiencia de una célula solar decrece con la temperatura. Estaríamos hablando del orden de una disminución de 0,04-0,06 puntos porcentuales por cada grado centígrado, para células de Si, y de 0,02-0,03 puntos porcentuales para las de GaAs, para temperaturas de funcionamiento próximas a las de ambiente

□

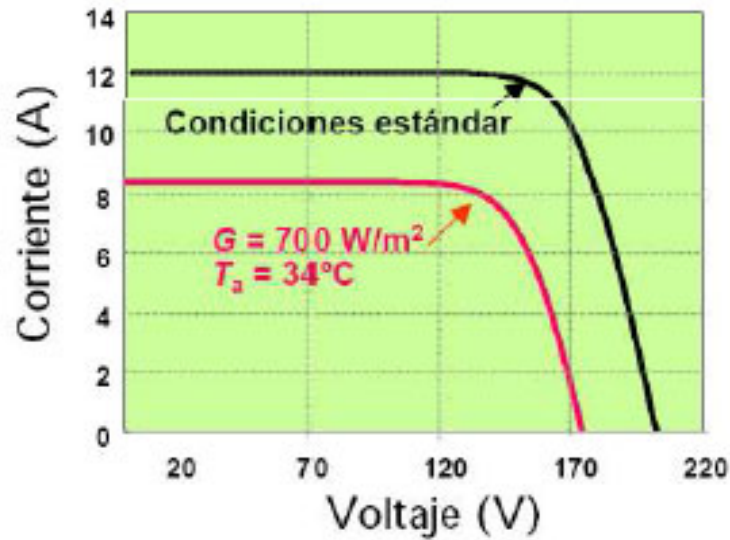


Figura 46: Grafica curva I-V. Fotografía adaptada de Sección Departamental de Electrónica-Física U.P.M

Si hacemos el estudio teniendo en cuenta la intensidad de iluminación, la fotocorriente de las células solares practicas es directamente proporcional a la intensidad de la radiación incidente. Esta proporcionalidad permite el siguiente planteamiento: si la fotocorriente al nivel de iluminación definido como unidad (normalmente 1 sol, $AM1=100mW/cm^2$) es I_{L1} , la fotocorriente a un nivel de iluminación X (factor de concentración: X soles) veces superior es:

$$I_l = X I_{L1}$$

Y si V_{oc1} es la tensión de circuito abierto a 1 sol, la tensión a X soles se obtiene aplicando la ecuación $V_{oc} = m(Kt_c/e) \ln(\frac{I_l}{I_o} + 1)$, obtenemos esta otra ecuación

$$V_{oc} = V_{oc1} + \left(\frac{mKT}{e}\right) \ln X$$

Suponiendo que m e I_o no se alteran sensiblemente al aumentar el nivel de iluminación. Resumiendo en la siguiente ecuación:

$$\dot{\eta}(X) = [I_{L1} V_{oc1}(X) FF(X) / (X P_{L1})] [1 + (mKT_c / e V_{oc1}) \ln X]$$

Si no se tiene en cuenta la pequeña variación de FF, predice un aumento de la eficiencia producido por el aumento de la tensión de circuito abierto, que sigue una variación logarítmica con el nivel de concentración.

El crecimiento no puede ser indefinido, ni siquiera en el dispositivo ideal, debido a límites físicos que no son evidentes en el análisis efectuado hasta aquí. En la práctica, sin embargo, estos límites teóricos no se manifiestan y efectivamente se puede observar un crecimiento logarítmico para los niveles bajos de iluminación. Pero al aumentar más la intensidad de esta última y, por tanto, la corriente generada, las caídas óhmicas debidas a la resistencia serie de la célula ya no pueden despreciarse y son las responsables de un considerable deterioro de la eficiencia de conversión de los dispositivos.

Como combinación de todos los efectos mencionados, la variación de la eficiencia de conversión energética de una célula solar varía con la intensidad de la iluminación.

2.9- TIPOS DE INSTALACIONES: AUTÓNOMOS Y CONECTADOS A RED

En este apartado describiremos las dos aplicaciones típicas de los sistemas fotovoltaicos: autónomos y conectados a red.

En ambos casos es importante entender que, para llegar a prestar un servicio efectivo, los sistemas fotovoltaicos deben alcanzar la elevada fiabilidad que es tradicional en el ámbito de la generación de electricidad, donde los tiempos de vida de las instalaciones se cuentan por docenas de años. Esta fiabilidad se entiende como ausencia de averías, y alcanzarla no es cuestión de calcular tamaños o estimar producciones, sino de elección de materiales, instalación adecuada, protecciones, mantenimiento, etc.

2.9.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS

La electrificación de viviendas, pequeños núcleos de población, estaciones repetidoras de radio son alimentados en ocasiones por sistemas de energía autónomos de la red por diversos motivos, entre los cuales podemos destacar que llevar la conexión a la red eléctrica a puntos remotos puede ser una inversión muy elevada y que los tendidos eléctricos tienen que ser evitados en entornos medioambientales sensibles.

Posibilidades de sistemas de energía autónomos:

- Baterías primarias (bajas potencias).
- Generadores diesel.
- Energías renovables.
- Energía solar fotovoltaica.

Debido al alto coste de la energía fotovoltaica las primeras aplicaciones fotovoltaicas terrestres fueron autónomas en lugares remotos.

Con programas de incentivos, especialmente en Alemania, a partir de mediados de los 90 empezaron a instalarse de forma masiva instalaciones conectadas a red.

El aumento de producción de paneles fotovoltaicos ha reducido los costes de energía fotovoltaica significativamente.

Algunas de las ventajas de los sistemas fotovoltaicos autónomos:

- Medioambientalmente limpio (no combustible, silencioso, no emisiones)
- Alta fiabilidad
- Bajo mantenimiento.
- No necesita combustible
- Modularidad (fácil crecimiento y transporte).
- Utilizable en ambientes extremos.
- Utilizable en fuentes de energías móviles.
- Inconvenientes sistemas fotovoltaicos autónomos:
- Altos costes de inversión.

Un sistema fotovoltaico autónomo genera energía únicamente cuando hay radiación solar (potencia es proporcional a la irradiancia que incide en la superficie). Esta energía podemos tenerla con almacenamiento de energía adecuando la energía generada a la demanda, suministrando mayores potencias de forma puntual (ejemplo arranque de motores).

Y sin almacenamiento de energía, el sistema únicamente funciona cuando hay radiación solar.

Las principales aplicaciones sistemas fotovoltaicos autónomos son:

- Consumo:
 - Interiores
 - Exteriores
- Industriales:
 - Exteriores
 - Residencial remoto

Y si especificamos según las instalaciones tenemos:

- Pequeñas instalaciones:
 - Aplicaciones consumo.
 - Equipos telefónicos de emergencia.
 - Linternas solares.
 - “SHS”- “Solar Home System”: viviendas solares en países del tercer mundo.

- Medianas y Grandes instalaciones:
 - Sistemas telecomunicaciones.
 - Sistemas híbridos.
 - Electrificación rural países industrializados.

“Solar Home System” es un concepto bien definido. Se considera los requerimientos energéticos “mínimos” de una vivienda en un país en vías de desarrollo.

Un módulo fotovoltaico de 50W (50cmx100cm) puede suministrar electricidad a tres lámparas y una TV en blanco y negro que es lo que se considera mínimo para una vivienda del tercer mundo. El sistema consiste en el panel, el regulador de carga y la batería que permite el funcionamiento del sistema durante dos o tres días.

El coste del sistema solar es entre 500\$ y 1500\$ dependiendo del mercado local e impuestos. Debido a su alta fiabilidad y bajo mantenimiento la energía fotovoltaica es ampliamente utilizada en el suministro de energía a sistemas de telecomunicaciones remotos como repetidores.

Los repetidores en muchos casos se encuentran situados en montañas sin conexión de red eléctrica cercana. Cuando la potencia va siendo mayor el coste de los sistemas fotovoltaicos autónomos aumenta en gran medida debido a las grandes fluctuaciones estacionales.

Sistemas híbridos (solar-eólico o solar-diesel) reducen costes de forma significativa. Sol y viento en muchas ubicaciones son complementarias. Un generador diesel utilizado en pocos días en invierno permite reducir el tamaño de la instalación fotovoltaica y aumentar la disponibilidad energética.

En la siguiente ilustración tenemos el diseño de un sistema fotovoltaico autónomo

□

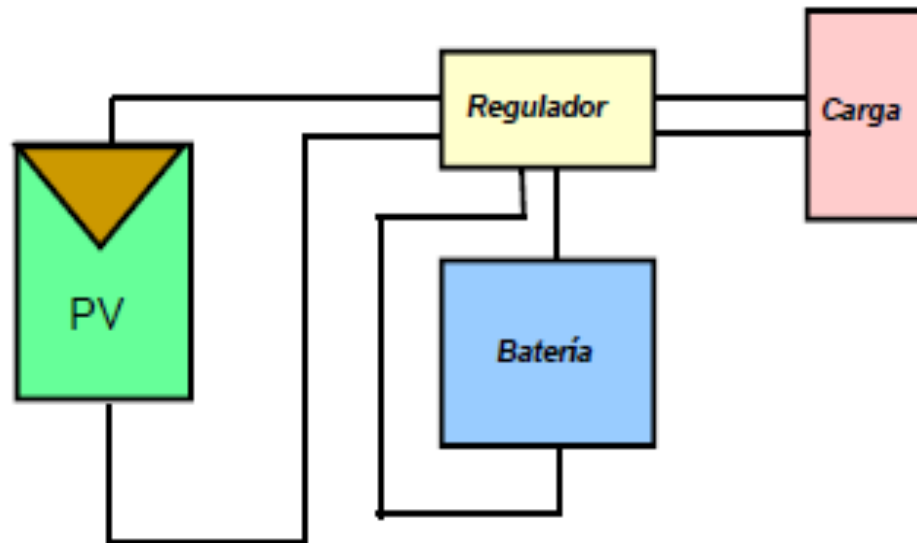


Figura 47: Sistema Fotovoltaico Autónomo. Fotografía adaptada de Sección Departamental de Electrónica-Física U.P.M

- Sistema de captación (Paneles fotovoltaicos)
- Sistema de almacenamiento (Baterías)
- Sistema de regulación y control: cuya finalidad es proporcionar la regulación de carga y descarga de la batería.
- Sistema de distribución y consumo: cuya finalidad es trasladar a los puntos de consumo la electricidad producida, adaptándola a las necesidades cuando sea necesario.

Los elementos principales de este sistema son paneles, baterías, regulador, MPPT, inversor y un convertidor entre otros.

Baterías:

Suministran energía al sistema cuando los paneles fotovoltaicos no generan energía. Suministran grandes potencias instantáneas y mantienen un nivel de tensión estable. Pero las baterías no se cargan totalmente después de cada descarga. La batería tiene pequeños ciclos carga/descarga diarios. La carga/descarga de la batería es lenta. La capacidad de la batería depende de la corriente (o velocidad) de descarga, de la capacidad aumenta a bajas corrientes de descarga, la tensión a la cual la batería es descargada. Cuanto menor sea la tensión final más capacidad de descarga también afecta la temperatura teniendo que a mayor capacidad a mayor T.

Regulador:

Hemos indicado que la tensión del panel se “autorregula” a través de la tensión de la batería. Para ello se selecciona la tensión del panel unos voltios por encima de la tensión de batería con el objetivo de que cargue a la batería aún a altas temperaturas (cuando baja la tensión del panel).

Inconvenientes:

- Desperdicio de potencia ya que el panel no trabaja en el punto de máxima potencia.
- Peligro de sobrecarga ya que el panel cuando la batería este ya cargada seguirá suministrando corriente a la batería (Gasificación).
- Peligro de sobrecarga ya que la batería se podría descargar del todo si no hay radiación solar durante un periodo de tiempo dado (Sulfatación).

Para estos inconvenientes contamos con el regulador su misión es proteger a la batería ante sobrecargas y sobredescargas.

La batería no pueda sobrecargarse en ningún momento porque el regulador interrumpe la carga de la batería si está cargada. Hay que limitar la descarga de la batería impidiendo sobredescargas el regulador interrumpe la descarga de la batería una vez que ha caído por debajo de un estado de carga.

Un regulador tiene un consumo interno bajo (alto rendimiento), compensación de las tensiones de corte en función de la temperatura (4 a 6mV/K), dificultad para aplicar la polaridad inversa, alta fiabilidad (dispositivos sobredimensionados).

Podemos evitarnos un regulador para evitar sobrecarga si contamos con Instalaciones con batería grande, en instalaciones donde la relación entre la potencia de los paneles y la capacidad de la batería es muy pequeña la corriente de carga difícilmente dañará a las baterías.

También si contamos con paneles autorregulados que son paneles que tienen tres o cuatro células en serie menos por lo que no pueden sobrecargar las baterías. La corriente de carga será menor. Se evita el regulador pero la carga no será tan eficiente.

MPPT:

Un problema del acoplo batería-panel es que el panel no trabaja en el punto de máxima potencia.

MPPT (Maximum Power Point Tracker) es un convertidor que desacopla la característica del generador PV y la batería obligando al primero a trabajar en el punto de máxima potencia. Como todo tiene sus ventajas e inconvenientes:

Ventajas:

- Aumento de producción de potencia del módulo con una reducción de costes del sistema.
-

Inconvenientes:

- Rendimiento del convertidor disminuye la producción del módulo especialmente a bajas cargas. Tiene una Influencia negativa en la fiabilidad del sistema (un elemento más en serie).

Inversores:

La mayoría de los equipos que utilizamos en una vivienda funcionan con corriente alterna la complejidad y el coste están relacionadas con la calidad de la forma de onda:

- Cuadrada
- Sinusoidal modificada
- Sinusoidal

Convertidores DC/DC:

En electrónica lineal se consigue la tensión deseada mediante un transistor que trabaja en la región activa como una resistencia variable siendo, sencilla, barata, sin ruidos pero a su vez poco eficiente pudiéndola usar en pocas aplicaciones.

En electrónica de Potencia el dimensionado se consigue la tensión deseada mediante un transistor que trabaja en modo conmutación siendo compleja, produce ruidos (EMI), eficiente y la podemos usar en multitud de aplicaciones.

2.9.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A RED

Un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red (SFCR) es un sistema cuya función es producir energía eléctrica en condiciones adecuadas para poder ser inyectada en la red convencional.

□

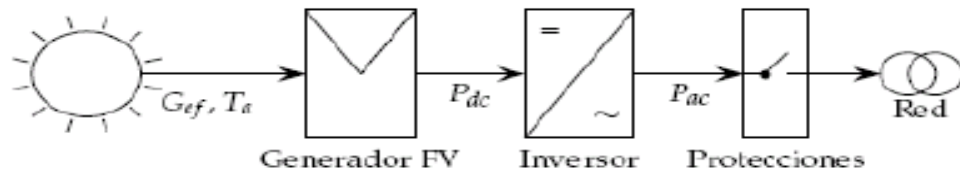


Figura 48: Sistema Fotovoltaicos conectado en red. Fotografía adaptada de Sección Departamental de Electrónica-Física U.P.M

El objetivo de los SFCR es maximizar la producción energía eléctrica los SFCR tienen unos gastos de inversión muy altos que se van amortizando a lo largo de la vida del sistema pero se requieren altas fiabilidades para poder amortizar el SFCR.

Una instalación fotovoltaica se compone, esquemáticamente de los siguientes elementos:

- Módulos fotovoltaicos: A través del efecto fotovoltaico son los encargados de transformar la radiación solar en energía eléctrica, de manera que si se conectan varios módulos en serie, se obtiene una fuente de energía eléctrica en corriente continua.
- Inversor fotovoltaico: A través de la electrónica de potencia, los inversores fotovoltaicos se encargan de transformar la corriente continua procedente de los módulos fotovoltaicos en corriente alterna a la misma tensión y frecuencia que la red a la que se va a inyectar la electricidad.

Tipos de instalaciones:

- Instalaciones en suelo:
 - Producción de energía inyectada a la red.
 - Primas a la energía inyectada.
- Instalaciones en edificios:
 - De acuerdo al CTE

Aquí tenemos la producción solar inyectada a la red.

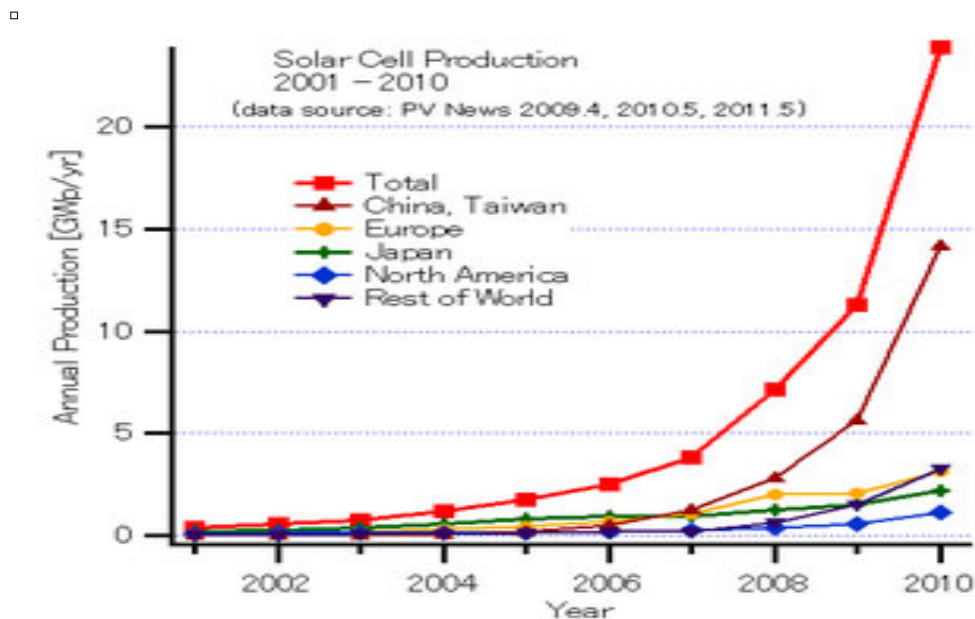


Figura 49: Grafica producción solar inyectada a la red. Fotografía adaptada de es.wikipedia.org

El diseño de un SFCR sobre suelo tiene como objetivo maximizar la producción energética anual del sistema con el menor coste y la menor ocupación de terreno posibles.

Como primera clasificación distinguiremos entre los sistemas estáticos, aquellos cuya inclinación y orientación permanece inalterable, y los sistemas de seguimiento.

Estáticos con seguimiento:

- Doble eje (Norte a Sur y Este a Oeste)
- Acimutal (Este a Oeste)
- Polar
- Horizontal (Norte a Sur)

El mejor método de seguimiento desde la perspectiva de la producción eléctrica es el denominado a doble eje, que consigue apuntar al sol con precisión a lo largo de todo su recorrido.

En el siguiente puesto de los que optimizan la producción destaca el seguimiento acimutal (Este a Oeste) , que sacrifica un movimiento de Norte a Sur para conseguir sistemas más económicos.

Otro planteamiento diferente es el utilizado por el seguimiento polar. El único eje sobre el que se produce el giro está inclinado de forma paralela al eje de rotación de la Tierra,

consiguiendo que el generador aparezca al sol como perpendicular a sus rayos durante gran parte del recorrido. No obstante, las complicaciones estructurales y de giro, y la dificultad de su implantación en grandes plantas han provocado que su uso sea ocasional.

Por último se debe mencionar el método de seguimiento horizontal con eje Norte-Sur. Sus ventajas son la sencillez y estabilidad estructural (el eje es horizontal y paralelo al terreno, con tantos puntos de apoyo como se consideren necesarios), la facilidad de motorización, así como el mejor aprovechamiento del terreno en relación a un sistema de doble eje.

El mejor aprovechamiento de terreno depende directamente del porcentaje de radiación que quedará sombreada por los seguidores cercanos, lo que se conoce como sombras mutuas. En general, cuanto más exacto es el método de seguimiento, menos eficiente es su aprovechamiento de terreno: para un mismo valor de radiación sombreada, la separación entre seguidores aumenta en sistemas que apuntan mejor. De ahí que los sistemas estáticos sean la opción preferida cuando el terreno disponible sea limitado y se desee alcanzar una potencia instalada determinada (por ejemplo para aprovechar toda la capacidad que ofrece el punto de conexión concedido) o limitar la inversión económica a costa de reducir la productividad del sistema.

En equipos que se utilicen todo el año o en invierno, el día más desfavorable corresponde al 21 de diciembre. En este día la altura solar es mínima y al mediodía solar tiene el valor siguiente:

$$h_o = (90^\circ - \text{latitud}) - 23,5^\circ$$

El cálculo se realiza a mediodía el día que la altura solar es mínima. Se sobredimensiona esta distancia para considerar las primeras y últimas horas del día.

En la siguiente figura vemos la distancia mínima d , entre filas de módulos teniendo en cuenta la angulación. Pero la época del año donde menos radiación de sol tendremos corresponde al invierno, es en esta época donde deberemos de hacer un ajuste para aprovechar al máximo la irradiación que nos proporciona el sol.

También tenemos que tener en cuenta que en invierno hace una temperatura exterior muy baja con lo cual las placas solares fotovoltaicas no trabajaran del mismo modo que en verano, ya que es en invierno donde al ser la temperatura mas baja nos proporciona una potencia inferior a la del verano.

□

$$\cos \alpha = \frac{d_2}{l} \Rightarrow d_2 = l \cos \alpha$$

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{z}{l} \Rightarrow z = l \operatorname{sen} \alpha$$

$$\operatorname{tg} h_0 = \frac{z}{d_1} = \frac{l \operatorname{sen} \alpha}{d_1} \Rightarrow d_1 = \frac{l \operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{tg} h_0}$$

$$d = l \left(\cos \alpha + \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{tg} h_0} \right)$$

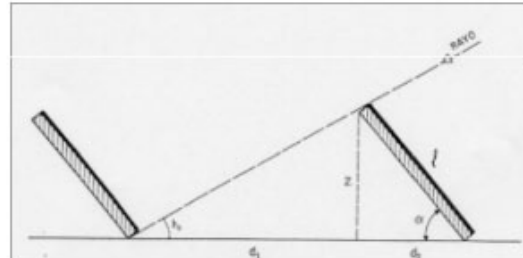


Figura 1. Distancia mínima entre módulos

Figura 50: Evaluado solsticio de invierno a mediodía. Fotografía adaptada de Sección Departamental de Electrónica-Física U.P.M

En diciembre y primera mitad de enero, incluso respetando dicha distancia mínima, pueden producirse sombras de unas hileras de módulos sobre las posteriores en las primeras y últimas horas del día. Por ello, es imprescindible aumentar en un 25% la distancia **d** obtenida en la fórmula.

El diseño de un SFCR en edificación es frecuentemente más complejo que el de un SFCR sobre suelo porque la integración del sistema fotovoltaico con el edificio exige tener en cuenta muchos factores que condicionan la ubicación y la configuración del generador. Así, la orientación e inclinación del generador ya no puede ser elegida para optimizar la producción energética sino que las características propias del edificio y de los elementos que alberga obligan muy frecuentemente a optar por ángulos que difieren del óptimo. En este tipo de sistemas, el diseñador debe tomar las decisiones oportunas para aprovechar las sinergias entre edificio y sistema fotovoltaico, reduciendo las posibles interferencias entre uno y otro. Por ejemplo, un generador fotovoltaico puede ser instalado como toldo fijo sobre ventanas reduciendo la insolación que entra en el edificio y por tanto, disminuyendo la carga térmica en el mismo. La ubicación del generador vendrá determinada por la orientación de la fachada que se pretende sombrear, su inclinación será un compromiso entre la producción energética del SFCR y la cantidad de sombra deseada, y el tamaño del generador dependerá del área acristalada a sombrear.

Inversor:

La información que se puede obtener de la ficha técnica proporcionada por el fabricante de un inversor puede incluir los siguientes parámetros:

Potencia nominal y máxima, siendo ésta un porcentaje de sobrecarga que el equipo es capaz de soportar durante un determinado período de tiempo (indicado por el fabricante).

Ventana de búsqueda del Punto de Máxima Potencia: es el rango de tensiones en las que el inversor aplica un algoritmo de búsqueda del MPP del generador fotovoltaico. Cuando este punto permanece fuera de esta ventana, el inversor fija en el generador FV la tensión correspondiente al valor límite de la ventana. Por tanto, configurar un generador de forma que el MPP recaiga fuera de esta ventana con cierta frecuencia no tiene consecuencias perniciosas para el inversor, pero ocasiona pérdidas energéticas variables según la frecuencia de este hecho.

Tensión máxima de entrada: es la máxima tensión que el inversor puede aguantar sin sufrir una avería. A diferencia de la ventana de tensiones anterior, sobrepasar esta tensión tiene consecuencias importantes sobre algunos componentes de entrada del inversor.

Tensión nominal de salida: es la tensión de red a la que se puede conectar el inversor (habitualmente 230Vdc para equipos monofásicos y 400Vac para equipos trifásicos).

Eficiencia máxima: máximo valor que toma la relación entre potencia de salida y potencia de entrada. En inversores de calidad la eficiencia es estable en un amplio rango de funcionamiento del equipo y de un valor cercano a la eficiencia máxima.

Rendimiento europeo: es la relación entre la energía entregada por un inversor que recibe una energía producida por un generador fotovoltaico funcionando en unas condiciones de radiación características de la zona centroeuropea. Este parámetro fue propuesto con el objetivo de poder comparar equipos de diferentes fabricantes con un criterio de calidad energética. Debe tenerse en cuenta que su valor está ligado a unas condiciones de radiación determinadas y, por tanto, no puede aplicarse sin corrección previa al cálculo de producción en lugares con diferente insolación.

Umbral de arranque: según las unidades en las que se expresa, puede indicar la radiación solar incidente en el generador (W/m^2) o la potencia de entrada (W) necesaria para que el inversor comience el proceso de conversión.

En la siguiente figura tenemos los parámetros más importantes de un inversor

□

Parámetro	Unidades	Símbolo
Valores de entrada CC (o DC)		
Intensidad máxima a la entrada	A	$I_{INV,Max,DC}$
Tensión máxima a la entrada	V	$V_{INV,Max}$
Potencia nominal de entrada	W	$P_{INV,DC}$
Límite inferior de rango de tensión para que el inversor busque el PMP	V	$V_{INV,minPMP}$
Límite superior de rango de tensión para que el inversor busque el PMP	V	$V_{INV,maxPMP}$
Eficiencia a máxima		%
Eficiencia europea		%

Figura 51: Parámetros de un inversor. Fotografía adaptada de Sección Departamental de Electrónica-Física U.P.M

En la siguiente figura podemos ver la eficiencia de un inversor

□

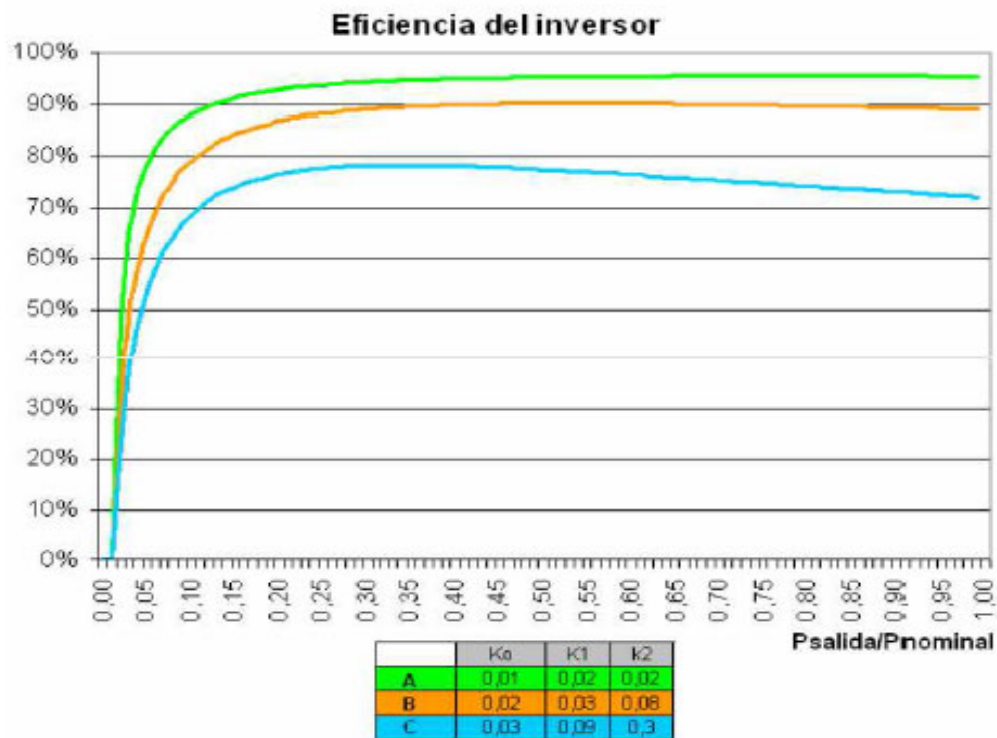


Figura 52: Gráfica de un inversor. Fotografía adaptada de Sección Departamental de Electrónica-Física U.P.M

Sin embargo, el equipo que en un SFCR se denomina inversor es el encargado de realizar las siguientes funciones:

- Convertir energía continua en energía alterna con una alta eficiencia.
- Realizar el seguimiento del punto de máxima _ potencia del generador fotovoltaico.
- Protección de la parte de alterna (Anti-islanding).
- Protección de la parte de continua (Controlador de aislamiento).
- Monitorización.

En la siguiente figura tenemos las partes que conlleva un inversor.

□

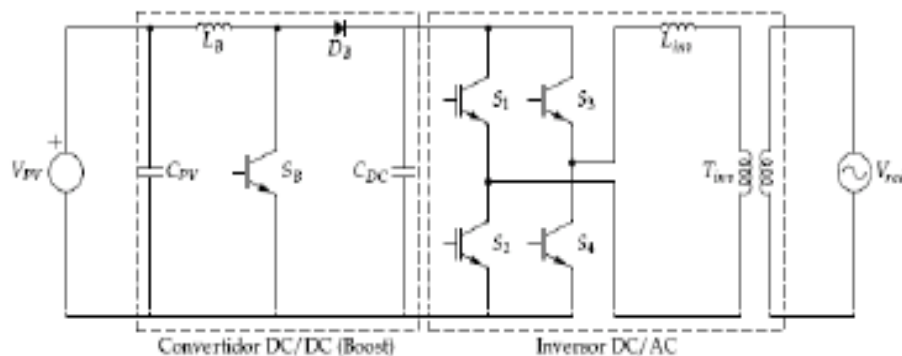


Figura 53: Partes de un inversor. Fotografía adaptada de Sección Departamental de Electrónica-Física U.P.M

Las cuales describimos a continuación:

- Convertidor DC/DC: adecúa (eleva o reduce) la tensión de salida del -generador a la tensión necesaria para el puente de conmutación. Puede realizar las funciones de búsqueda del punto de máxima potencia.
- Puente inversor: realiza el troceado de la señal continua para convertirla en alterna.
- Filtro de salida: elimina o atenúa los armónicos no deseados.
- Transformador: adecua el valor de tensión de salida del puente al de la red y proporciona aislamiento galvánico entre la parte DC y AC.
- Control: realiza la supervisión de la entrada y salida del convertidor DC/DC y del puente inversor y entrega las consignas correspondientes para localizar y seguir el MPP del generador, y para obtener una señal sinusoidal con bajo contenido en armónicos en la salida del inversor.

Una de las funciones que incorpora el sistema de control de un inversor de conexión a red es la localización y seguimiento del MPP del generador. Dado que este punto no es conocido a priori, debe ser localizado mediante un algoritmo de búsqueda. No debe olvidarse que el MPP depende de las condiciones de radiación y temperatura, y por tanto, su posición será cambiante con el tiempo. En general, el sistema de control recabará información sobre el funcionamiento del sistema (por ejemplo, tensión y corriente a la salida del convertidor DC/DC) y, en base al algoritmo empleado, dictará ordenes que alteren el punto de trabajo.

Por su parte el uso del MPPT nos aportara unas ventajas y a su vez unos inconvenientes que describiremos a continuación:

- Ventajas: Aumento de producción de potencia del módulo (más del 40% en el caso mostrado) y una reducción de costes del sistema.
- Inconvenientes: Rendimiento del convertidor que disminuye la producción del módulo especialmente a bajas cargas y una influencia negativa en la fiabilidad del sistema (un elemento más en serie).

A la hora de escoger inversores tenemos que seleccionarlos en función de lo que vayamos a necesitar y para ello tendremos en cuentas las siguientes consideraciones:

Los inversores centrales son recomendables para instalaciones de medio o gran tamaño. Permiten reducir costes (de adquisición, instalación y mantenimiento) y aumentar fiabilidad y eficiencia.

Los inversores orientados a rama son particularmente útiles en algunos sistemas de integración arquitectónica, al poder adaptarse mejor a las condiciones de funcionamiento con orientaciones e inclinaciones diversas.

La potencia del inversor debe estar en consonancia con la potencia del generador (una planta de 1 MWp debiera contar con 10 inversores de 100 kW o 4 de 250 kW, pero no con 200 de 5 kW).

Por otra parte, la salida de un inversor puede ser monofásica o trifásica. En general, un inversor monofásico no supera la potencia de 5kW, y son poco comunes los inversores trifásicos de potencia inferior a 10 kW.

Inversor Vs Generador:

El número total de módulos debe estar de acuerdo

Módulos en serie: Los valores máximos y mínimos de tensión del generador PV deben encontrarse en el rango de tensiones PMP del inversor.

Módulos en paralelo: A partir de los valores anteriores y de la potencia del generador PV se calcula el número de módulos en paralelo.

Aun así la producción del SFCR depende de:

- La radiación solar recibida en el generador fotovoltaico.
- La potencia del generador (Wp)
- Los rendimientos de los diferentes elementos del sistema como pueden ser:
- Factor de rendimiento por sombreado: Se realiza un análisis de las pérdidas debido al sombreado y se consideran que las pérdidas son las mismas a lo largo del año y es necesario evaluarlas.
- Factor de rendimiento por polución ambiental: Se considerará constante a lo largo del año y del orden del 1-2%.
- Factor de rendimiento por dispersión de parámetros en módulos. Se considerará constante a lo largo del año y del orden del 3-5%.
- Factor de rendimiento por pérdidas por temperatura en módulos. La temperatura de la célula afecta a la potencia que genera el módulo. La potencia nominal se evalúa en condiciones estándar de medida (1000 W/m² y T_{cel}=25°C). Tenemos que considerar la temperatura de la célula para evaluar.
- Factor de rendimiento por pérdidas en conductores de continua. En los paneles fotovoltaicos por su propia configuración carente de partes móviles, con el circuito interior de las células y las soldaduras de conexión muy protegidas del ambiente exterior por capas de material protector, la disminución del rendimiento por pérdidas de continua es escasa. Normalmente las pérdidas en conmutadores, fusibles y diodos son muy pequeñas y no es necesario considerarlas, mientras que las caídas en el cableado sí pueden llegar a ser muy importantes cuando son largos y se opera a baja tensión en CC. Concretamente, para cualquier condición de trabajo y según las especificaciones, los conductores de la parte de CC deberán de tener la sección suficiente para que la caída de tensión sea inferior al 1,5 %. Se considera constante a lo largo del año.
- Factor de rendimiento por pérdidas en conductores de alterna. Al igual que las pérdidas de continua las de alterna son escasas. La posibilidad de pérdidas de la instalación está directamente relacionada con la calidad de los materiales, equipos y proceso de montaje, por eso es fundamental usar en todos los casos componentes de la calidad especificada en el diseño. En este caso, de acuerdo con las especificaciones, el valor máximo admisible de la caída de tensión en la parte de CA es del 2%. Se considera constante a lo largo del año.
- Factor de rendimiento del inversor. La eficacia del convertidor está definida como la relación entre la potencia que éste entrega a la utilización y la potencia que el convertidor extrae de los paneles, en función de la carga. El rendimiento del inversor se ve afectado directamente por la temperatura de manera que a medida que aumenta ésta el rendimiento disminuye. Datos del fabricante

aseguran un rendimiento mínimo del 95 %. Se asume constante a lo largo del año.

En resumidas cuentas tenemos que el rendimiento global del sistema es el producto de cada uno de los rendimientos dependiendo del mes del año.

Y para ello ponemos la siguiente fórmula:

$$\dot{\eta} = FINV \times FS \times FPOL \times FD \times FT \times FF \times FCCC \times FCCA$$

La producción a lo largo de un día medio de un mes será la potencia del generador por el número de horas de Sol pico del mes por el rendimiento global:

La producción anual será el sumatorio de la producción mensual mediante las siguientes formulas:

$$E_d = P_{pv} \times HSP \times \dot{\eta}_G \quad \text{que nos lleva a la anual } E_a = \sum_{i=1}^{12} E_d \times d_{mes}$$

La productividad de referencia o Reference Yield, Y_R , definido como la irradiación solar anual sobre el plano del generador fotovoltaica, expresada en kWh/m², respecto de la nominal G^* de 1 kW/m². Las unidades son horas y nos indican el número de horas de sol existentes promediadas a 1kW/m², según la siguiente fórmula:

$$Y_R = G_a(\alpha, \beta) / G^*$$

La productividad final o Final Yield, Y_F , definida como la energía útil anual producida por el sistema en un cierto periodo de tiempo, E_a , por la unidad de potencia instalada expresada en kWh/kWp. Nos indica el número de horas de sol promediadas a 1kW/m² que nuestro sistema aprovecha a la potencia pico del generador, mediante la siguiente fórmula:

$$Y_F = E_a / P^*$$

Performance Ratio, PR, expresa la relación entre la productividad final y la de referencia. Se evalúa también de forma experimental ya que todos los datos pueden ser medidos al final del año según la siguiente fórmula:

$$PR = Y_F / Y_R$$

2.10- Conclusiones Tema 2

En este capítulo hemos descrito el funcionamiento íntegro de una placa solar fotovoltaica de la siguiente manera:

- Hemos descrito el funcionamiento desde que se iluminan los cristales de silicio, continuando con el llamado efecto fotovoltaico.
- Hemos explicado la curva I-V de la célula solar.
- Hemos evaluado la I_{sc} y la V_{oc} , y como afecta al punto de máxima potencia.
- Hemos observado el factor de forma, la influencia de la temperatura y la irradiancia.
- Y para terminar con el capítulo hemos descrito los distintos tipos de instalaciones: autónomas y conectados a red.

TEMA 3 – FIABILIDAD MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

3.1- INTRODUCCION

Primero tendríamos que definir que entendemos por fiabilidad y nos remontamos hasta el 9 de abril de 1962 este neologismo fue admitido en Francia por la Academia de Ciencias, que en un principio adoptó el vocablo “viabilité”, a propuesta de M. Léauté. La definió como “Una magnitud que caracteriza la seguridad de funcionamiento según las normas prescritas”. La ingeniería de Fiabilidad es el área de conocimiento que intenta garantizar que el producto permanecerá en buenas condiciones durante un periodo razonable de tiempo.

La fiabilidad o falta de fiabilidad de un producto tiene implicaciones desde puntos de vista muy diversos: Desde un punto de vista humano la ausencia de fiabilidad en un producto puede descartar su utilización con seres vivos, uso militar, uso aeroespacial...por considerar las repercusiones del fallo no asumibles para el nivel de fiabilidad obtenido, y desde un punto de vista puramente económico, es deseable una alta fiabilidad para reducir los costes totales del producto.

El hecho de que en algunos sistemas militares el coste anual de mantenimiento sea diez veces el coste original del mismo, pone de manifiesto la necesidad de no solo evaluar los costes iniciales de un producto sino los de toda la vida del producto (ciclo vida). También hay que considerar el hecho de que los fallos pueden afectar a la seguridad. Existen otros aspectos como retrasos de horarios, incomodidades, insatisfacción del cliente y pérdida de prestigio del fabricante que pueden ser muy importantes. Cada vez son más las empresas y organismos que en sus contrataciones exigen el cumplimiento de ciertas normas de fiabilidad (por ejemplo un nivel de fiabilidad de acuerdo al MIL HDBK217 en USA,...).

En la industria, a medida que avanza el tiempo, los equipos y sistemas crecen en complejidad y existen mayores exigencias a la eficiencia de los costos del ciclo de vida útil de las máquinas; por ello, diseñadores y fabricantes intentan llegar al objetivo de calidad exigido por el mercado minimizando el coste de toda la vida del producto.

Desde el diseño existe la necesidad de entregar equipos o sistemas que tengan las prestaciones deseadas por el cliente y que además sean fiables, de fácil mantenimiento y con funcionamiento seguro y económico durante su vida útil.

3.2- CONCEPTOS DE FIABILIDAD

Para poder continuar con la explicación de fiabilidad vamos a explicar los siguientes conceptos que se evalúan para declarar un dispositivo fiable:

- Merito de un sistema.
- Probabilidad.
- Efectividad de un sistema.

3.2.1 MERITO DE UN SISTEMA

Cuando surge la necesidad de implantar un nuevo dispositivo, es necesario ver cómo va a afectar al resto de funcionamiento del sistema, su integración con otros sistemas, es decir, cómo de deseable va a ser su adquisición, empleo e integración. Esto es lo que se conoce como mérito de un sistema.

Todo esto se tendrá en cuenta al elegir un sistema concreto dentro de la amplia gama de sistemas similares, es decir, en la elección del sistema que más se adecue a nuestras necesidades. A esto se le llama elección por mérito y se basa en cuatro factores:

- Coste. Este factor hace referencia a los costes de adquisición, de mantenimiento y amortización.
- Plazos de entrega. La observación de este factor nos da la idea de la capacidad de la industria de disponer del sistema seleccionado en el momento en que este sistema es necesario y se prevé su adquisición.
- Necesidades de personal. Fija la cantidad de personal necesaria para llevar a cabo las tareas de funcionamiento y mantenimiento del sistema adquirido, a la vez que determina el grado de formación que necesita dicho personal.
- Efectividad. Engloba las características de diseño y funcionamiento.

El resultado del mérito de un sistema posiblemente no nos haga decidirnos por uno u otro, ya que será posible obtener diferentes puntuaciones para ese mismo sistema en función de los parámetros que se han de evaluar.

3.2.2 PROBABILIDAD

"La probabilidad de un suceso es un número que cuantifica en términos relativos las probabilidades de éxito de ese suceso"

Enfoque clásico o a priori (Laplace, 1812): consiste en estimar la probabilidad de un suceso (X_i) como la razón entre los resultados favorables a ese suceso y el número total de resultados posibles que se pueden dar en la realización del experimento aleatorio.

$$P_{(X_i)} = \frac{n^{\circ} \text{ de resultados favorables}}{n^{\circ} \text{ de resultados posibles}}$$

En la que:

Los elementos de E tienen la misma probabilidad de ocurrencia

$0 < P(A) < 1$ - Si A es un suceso imposible: $P(A) = 0$

Si A es un suceso seguro (contiene todos los sucesos elementales de E): $P(A)=1$

Si A' es complementario de A: $P(A) + P(A') = 1$. Por tanto: $P(A) = 1 - P(A')$

Enfoque frecuencionalista, a posteriori o estadístico: dado un suceso X_i asociado a la realización de un determinado experimento aleatorio, la estimación de la probabilidad de X_i a partir de este enfoque se basa en la repetición de una gran cantidad de veces del experimento aleatorio en las mismas condiciones, para así obtener la razón entre el número de veces que ha ocurrido ese suceso n_i y el número de repeticiones del experimento (n):

$$P(X_i) = \frac{n_i}{n}$$

La probabilidad del suceso A se determina a partir de la repetición sistemática (n veces) del experimento aleatorio en N ensayos independientes y en las mismas condiciones y el número de veces que se verifican los sucesos.

3.2.3 EFECTIVIDAD DE UN SISTEMA

Se define la efectividad de un sistema como la probabilidad de que este satisfaga adecuadamente la demanda operativa dentro de un tiempo dado cuando está funcionando dicho sistema en unas condiciones definidas. Esta efectividad dependerá de la frecuencia de fallos, de la dificultad encontrada en su reparación y mantenimiento, y sobre todo, de cómo de bien realice la tarea o función para la que fue adquirido.

La efectividad de un sistema es como un vector con los siguientes componentes:

- **Apresto operativo:** es la probabilidad de que el sistema esté funcionando satisfactoriamente o preparado para funcionar si fuese necesario en un instante de tiempo cualquiera en las condiciones definidas para este sistema.
- **Fiabilidad de misión:** es la probabilidad de que el sistema funcione sin fallos durante el tiempo que realiza una tarea.
- **Suficiencia de diseño:** es la probabilidad de que el sistema funcione dentro de lo especificado en su diseño, es decir, que el sistema realice correctamente la tarea para la cual fue adquirido.

3.3- DEFINICION DE FIABILIDAD

La definición de AFNOR X 06-501: Fiabilidad es la característica de un dispositivo expresada por la probabilidad de que un dispositivo cumpla una función requerida en las condiciones de utilización y para un periodo de tiempo determinado.

Siendo la probabilidad la relación entre un número de casos favorables y un número de casos posibles asociada a un tiempo t , según las definiciones, se deben determinar muy claramente los siguientes conceptos:

- **Funcionamiento satisfactorio.** Las definiciones de fallo y funcionamiento satisfactorio, ambas excluyentes, deben ser claras y sin ambigüedades.
- **Tiempo de funcionamiento (Misión).** La probabilidad de funcionamiento es en función del tiempo, por lo que debe especificarse su tiempo de funcionamiento.
- **Condiciones de funcionamiento.** La fiabilidad depende de las condiciones eléctricas y medioambientales de funcionamiento que deben ser especificadas.

La fiabilidad es una función de probabilidad; con esto decimos que, aunque se dispongan de datos estadísticos de la vida de un dispositivo o sistema, no queda completamente definido el comportamiento de cada uno de los dispositivos a lo largo de su vida útil, es decir, cada dispositivo se comportará de forma similar pero nunca igual a otro dispositivo.

La diferencia entre Calidad y Fiabilidad es que la Calidad garantiza que el producto sale de fábrica en buenas condiciones mientras que la Fiabilidad garantiza que el producto permanezca en buenas condiciones durante un periodo razonable de tiempo. Pero, evidentemente, la calidad de un producto contribuye a la fiabilidad del mismo.

Por tanto, la Calidad carece de la dependencia temporal de la Fiabilidad. Y esta dependencia temporal introduce una incertidumbre en la definición de fiabilidad, es decir, saber si un producto funcionará a lo largo de un periodo de tiempo es una cuestión de probabilidad.

Como la fiabilidad es una función del tiempo, lo que mejor mide la exposición al fallo es el tiempo, aunque puede suceder que en ciertos dispositivos no sea el tiempo la medida adecuada, debiéndose emplear otras formas de medida. Por ejemplo en el sector de automoción, en vez del tiempo se utiliza la distancia recorrida (kilómetros). Aunque en la mayoría de los casos, el tiempo es la magnitud adecuada y las demás medidas de exposición al fallo suelen traducirse a tiempo.

3.4- CONCEPTO DE FALLO

La fiabilidad es una medida del éxito con el que el sistema se ajusta a alguna especificación definitiva de su comportamiento. Cuando el comportamiento de un sistema se desvía del especificado se dice que es un fallo. Los fallos son el resultado de problemas internos no esperados que el sistema manifiesta eventualmente en su comportamiento externo. Estos problemas se llaman errores, y si carecen de causas mecánicas o algorítmicas se denominan defectos.

3.4.1 FALLOS CATASTRÓFICOS Y POR DEGRADACIÓN

Los fallos catastróficos son aquellos que hacen que algún parámetro del sistema o componente varíe de forma brusca su comportamiento impidiendo el funcionamiento del sistema o dispositivo dentro de los márgenes preestablecidos de actuación de este. Son fallos súbitos y totales.

En cambio, los fallos por degradación (también llamados no catastróficos o por deriva) son los que obedecen a una degradación lenta o progresiva en el tiempo de algunos de los parámetros de actuación del sistema que terminan por salirse de unas tolerancias o límites de correcto funcionamiento preestablecidos.

En nuestro proyecto tenemos que tener en cuenta que los sistemas fotovoltaicos tienen un alto coste de inversión con lo cual necesitaremos que tengan un alto porcentaje de fiabilidad, esta fiabilidad a día de hoy esta en torno a 25-30 años, a partir de los cuales empezaría la degradación. Estos 25-30 años son lo que nos dan los fabricantes de garantía. Para poder comprobar si el comportamiento de las placas es satisfactoria lo tendremos en función de la cantidad de potencia que nos entregue en condiciones normales de funcionamiento.

Definimos el fallo catastrófico de nuestra placa fotovoltaica cuando no nos entrega nada de potencia, puede ser por rotura de alguna de las células internas de la placa. Mientras que podemos tener un decremento en la entrega de potencia siempre dentro de unos límites. Estos límites los tenemos en base a la electricidad que nos pueda producir la placa existen unos plazos que nos aseguran que en los 10-12 primeros años la electricidad que nos va a generar la placa será del orden de un 90% de la electricidad

inicial, y que pasados 20-25 años estaremos hablando de un 80%. A parte de estos tenemos que tener en cuenta la margen de error que podemos tener con los sistemas de medición que podríamos hablar de un porcentaje de un 3%.

En resumidas cuentas podríamos hablar de una efectividad de casi un 75 % pasados los 30 años. La relación entre el fallo del componente y el del sistema merece algunos comentarios. Se sabe que en sistemas complejos el fallo catastrófico de un componente puede, evidentemente, producir el fallo catastrófico del sistema o, en algunos casos, el fallo por degradación de un componente puede causar un fallo catastrófico del sistema.

3.4.2 FALLOS INICIALES, POR DESGASTE Y ALEATORIOS

Los componentes se fabrican para soportar determinados niveles de sollicitación. En la práctica las sollicitaciones pueden presentar una serie de picos capaces de superar el nivel máximo permisible. La frecuencia de tales picos determina la probabilidad de fallo del componente. Evidentemente, los componentes no son exactamente iguales entre sí, aunque procedan de un mismo lote de fabricación, teniendo pequeñas variaciones en la fabricación, algunos de ellos incluso pueden tener defectos de fabricación. Además, la mayoría de los componentes envejecen, es decir, pierden resistencia al fallo.

Este modelo conceptual da lugar a la siguiente clasificación de los fallos:

- Fallos infantiles: componentes que fallan por defectos iniciales. Son los debidos a un defecto de la pieza como resultado de una deficiencia de diseño, fabricación o inspección. Los fallos que ocurren durante la fase de investigación y desarrollo de un programa suelen ser fallos infantiles.
- Fallos por desgaste: fallos originados por el uso del componente. Los componentes han perdido resistencia al fallo por su uso.
- Fallos aleatorios o por azar: son debidos a averías accidentales, debidas a un pico de sollicitación capaz de afectar a cualquier componente normal o no normal, nuevo o usado.

3.4.3 FALLOS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS

En un sistema, se llama fallo primario (o independiente) al fallo de un componente cuando no se debe al fallo de otro u otros componentes. Los fallos inducidos por el fallo de otro u otros componentes reciben el nombre de secundarios o dependientes.

3.5- ESFUERZO DE COMPONENTES

Los fallos de los componentes se deben a los esfuerzos a los que son sometidos dichos componentes. Estos factores que influyen en la tasa de fallo de los dispositivos se dividen en dos: esfuerzos ambientales y esfuerzos operativos.

- Los esfuerzos ambientales naturales son debidos a la influencia que provocan algunos agentes ambientales externos (temperatura, humedad, presión, etc) sobre el dispositivo, aumentando la probabilidad de fallo de estos. También se consideran parte de este tipo de esfuerzos los inducidos por el resto de elementos del sistema que alteran la probabilidad de fallo del dispositivo. Este tipo de dispositivos no suele provocar fallos catastróficos en reposo, pero producen un envejecimiento del dispositivo; por eso es necesario limitar la vida de ciertos dispositivos en reposo en un almacén.
- Los esfuerzos operativos son aquellos factores que afectan al funcionamiento del dispositivo. Ejemplos pueden ser las tensiones, corrientes, potencia, calor disipado que influyen sobre los dispositivos electrónicos. Este tipo de factores puede provocar fallos catastróficos.

3.6- ENSAYOS DE FIABILIDAD DE PLACAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

Una placa Fotovoltaica como hemos explicado en anteriores temas esta hecha de un modulo de silicio cristalino y es uno de los elementos más fiables del sistema fotovoltaico. Esta alta fiabilidad de estos materiales nos lleva a que tengan un largo periodo de garantía, es decir no se suelen estropear. Además los datasheets comerciales de los sistemas FV (fotovoltaicos) no se suelen mostrar igual que los dispositivos electrónicos o fuentes de potencia.

Los sistemas FV normalmente están en el exterior, por lo cual les afectaran las condiciones meteorológicas con el paso del tiempo, también dependerá de la situación geografía en la que se encuentren. Esta degradación esta basada en modelos de degradación aplicados en productos con una alta fiabilidad y un alto coste de eficiencia. La garantía de las placas FV se las podemos separar en dos puntos: que seria la garantía de los materiales de silicio y la garantía del montaje de la placa, suelen estar entre 1 y 5 años, también tenemos que asegurarnos que la placa nos produzca una suficiente energía acorde con sus características.

Los test de fiabilidad son diseñados para evaluar los fallos, cuantificarlos y intentar entender porque fallan para conseguir una solución para futuros diseños. Estos test se hacen de dos tipos: aplicándoles estrés durante muchos tiempo de exposición o aplicándoles alto estrés en cortos periodos de tiempo.

Los módulos son evaluados en diferentes periodos para intentar detectar cinco defectos diferentes que son los siguientes, norma IEC 61215:

- Defectos visibles por células agrietadas, burbujas o pérdida de algún mecanismo del circuito.
- Posibles fallos de los dispositivos en circuito abierto o tierra, que se miden ambos al final del test.
- Pérdida de rendimiento, la máxima degradación debe exceder el límite descrito un 8% al finalizar el test.
- Test de aislamiento. 1000v plus de electricidad son suministrados dos veces a los módulos para ver su eficiencia.
- Corriente en estado de humedad son inyectados al comienzo y al final de cada secuencia. Después de esta humedad se le hace un test de calor.

Si los módulos pasan estos test se les da una calificación estándar.

Ahora nos vamos a centrar en los módulos mono-cristalinos de silicio (c-Si) y los módulos poli-cristalinos de silicio (p-Si). Como otros dispositivos depende su tiempo de vida de la temperatura, humedad y radiación. Los módulos pueden degradarse como resultado de diferentes factores como son:

- Degradación del empaquetado de los materiales.
- Pérdida de adhesión del encapsulado.
- Degradación de la interconexión de la célula módulo.
- Degradación por entrada de humedad al dispositivo.
- Degradación del dispositivo semiconductor.

En el caso de los módulos de cristalino de silicio la degradación es del semiconductor ya que tiene una alta estabilidad el material del semiconductor.

Los estudios en campo abierto nos dan que las primeras causas de mal funcionamiento son debido a malos puntos de soldadura, grietas causadas por un granizo o problemas de interconexión de los dispositivos.

Existen dispositivos con tasas de fallos de 100 FITs o inferiores lo que supone que utilizando 100 dispositivos se necesitarían 100000 horas (11.4 años) para que aparezca el primer fallo. Es impracticable ensayar la fiabilidad de los dispositivos en condiciones normales de operación. Es necesario acelerar los mecanismos que causan los fallos de los dispositivos.

3.7- CONCLUSIONES TEMA 3

En este tema hemos hecho una introducción a la teoría de la fiabilidad para facilitar la comprensión de los resultados de nuestro ensayo acelerado en cuanto a fiabilidad.

- Hemos empezado describiendo los conceptos y definiciones de fiabilidad mas importantes.
- Hemos continuado explicando los tipos de fallo que se pueden dar haciendo una mención especial en el que se tendría que dar en nuestro proyecto.
- Hemos finalizado hablando de los esfuerzos de los componentes y comentando los ensayos de fiabilidad que se hacen a las placas solares fotovoltaicas.

TEMA 4 – MONTAJE E INSTRUMENTACIÓN

El procedimiento del ensayo acelerados en temperatura ha sido el siguiente:

- De forma periódica los módulos son caracterizados en un sistema de medida controlado en temperatura e irradiancia don de se caracterizan los módulos mediante la adquisición de la curva I/V, apartado 4.2.1.
- Los módulos fotovoltaicos son puestos en funcionamiento a alta temperatura con el objetivo de acelerar la vida del módulo. Para ello se ha montado un banco de pruebas donde los módulos se han iluminado mientras funcionaban a tres temperatura altas, 60°C, 72°C y 84°C. El banco de pruebas también dispone de un sistema de monitorización in-situ de las prestaciones de los módulos.

A continuación describiremos los diferentes equipos utilizados en el ensayo.

4.1- DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS

Para este ensayo hemos contamos con los siguientes instrumentos que procederé a describir a continuación:

- **FOCO HALOGENO DE 500 w MODELO IP65, medidas 6,5 x 5 cm**

□



Figura 53: Foco 500w IP65 usado en el PFC

Con este foco y mediante las caracterizaciones que explicare más adelante hemos conseguido emular un sol, es decir conseguimos que la placa nos de la máxima potencia que nos podría dar.

- **PLACA SOLAR MODELO MC-SPO.8-NF-GCS**

□

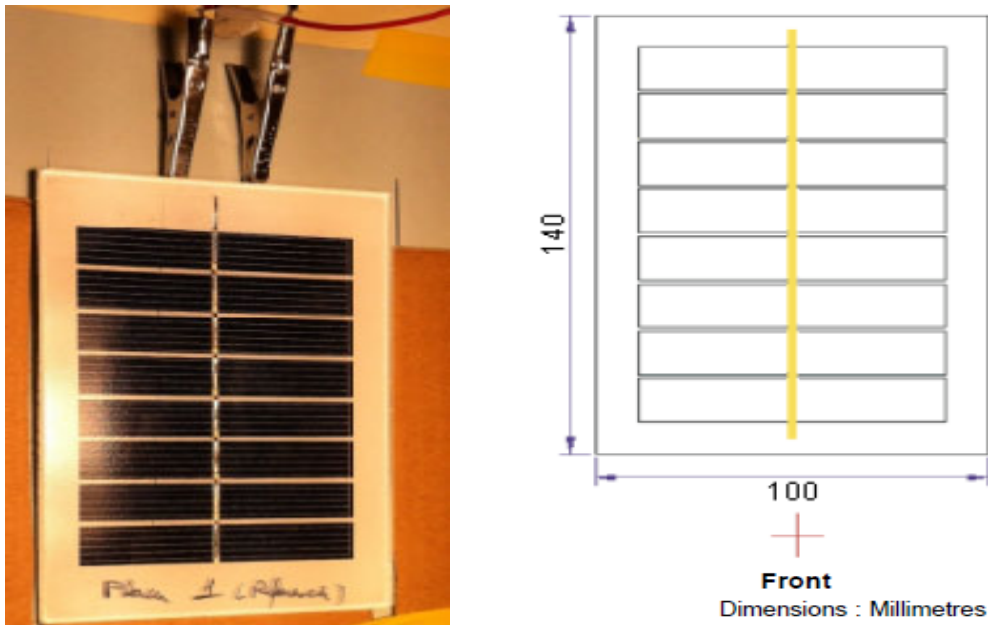


Figura 54: Placa solar modelo MC-SPO.8-NF-GCS usada en el PFC

Esta placa tiene las siguientes características:

- Alta eficiencia
- Alta transparencia teniendo un vidrio templado, bajo contenido en hierro.
- Excelente rendimiento con poca luz.
- DC nominal con salida estándar.
- Debido a la tecnología que usa no se produce deformaciones al congelarse el agua.
- Alto soporte a la presión del viento y carga de nieve elevada.

Esta placa ha superado los siguientes procesos para tener una buena garantía de calidad:

- Prueba de ciclo térmico.
- Prueba de choque térmico.
- Prueba Térmico/congelamiento y humedad elevada.
- Prueba de aislamiento térmico.
- Prueba de impacto.
- Mecánica, y viento prueba de giro de carga.

- Prueba de niebla salina.
- Luz y prueba de exposición al agua.
- Prueba de exposición al campo.

Esta placa tiene las siguientes curvas I-V

□

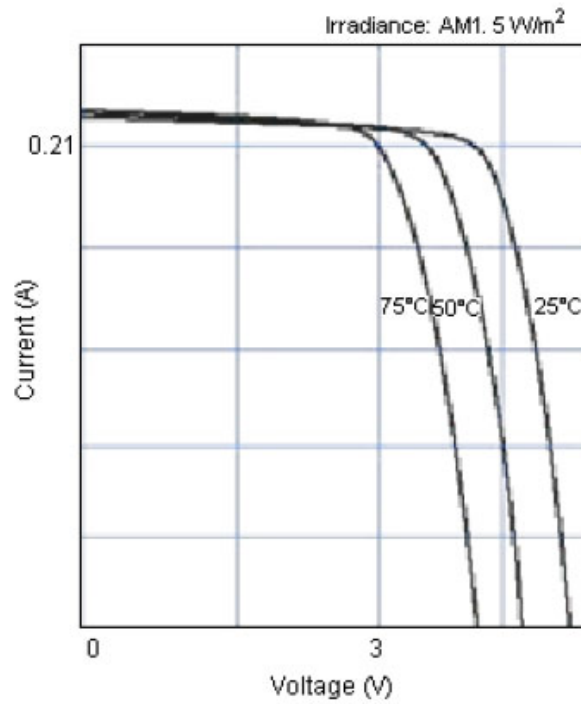


Figura 55: Curva corriente-voltaje a varias temperaturas modelo modelo MC-SPO.8-NF-GCS

□

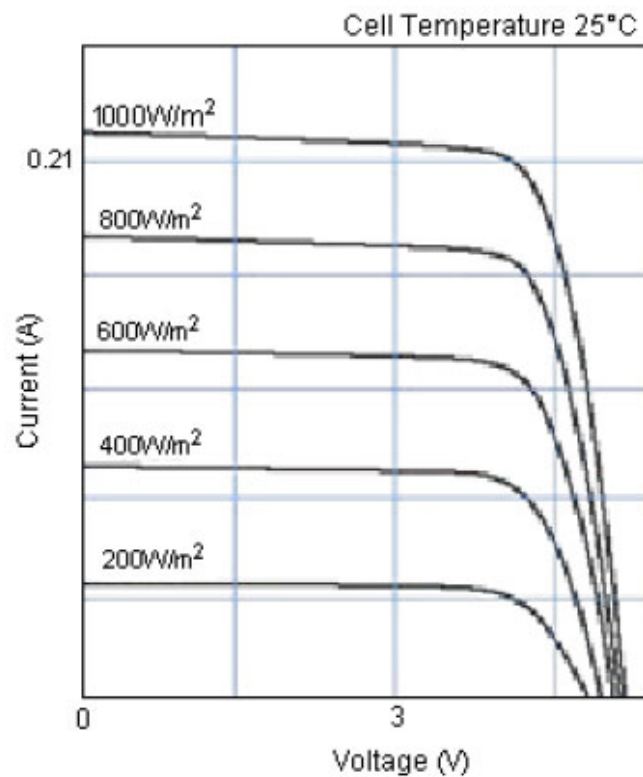


Figura 56: Curva corriente-voltaje según la irradiancia modelo MC-SPO.8-NF-GCS

MONO o Poly : Poly.

Máxima Potencia: 0.8W.

Máxima tensión de voltaje: 3.85V.

Máxima corriente: 0.21A.

Tensión de circuito abierto (V_{oc}): 4.80V.

Corriente de circuito abierto (I_{sc}): 0.23A.

Tamaño del módulo: 140 x 100 x 4.9mm.

Peso: 134g.

Máximo sistema de tensión: 720V dc.

Coeficiente de temperatura I_{sc} : 0.06%/K.

Coeficiente de temperatura V_{oc} : -0.36%/K.

Coeficiente de temperatura de P_m : -0.45%/K.

Rango de temperatura de funcionamiento: -40°C a +85°C.

Superficie máxima de capacidad de carga: 60ms (200kg/sq.m).

Admisible de carga granizo: Bola de acero cae desde una altura de 1m.

Tolerancia de salida: $\pm 3\%$ Frame (materiales, esquinas, etc): Aluminio (0.8w epx).

Garantía: Libre de defectos en materiales y mano de obra durante 5/10 años el 90%, 25 años el 80% de la potencia de salida mínima.

MEDIDOR DE CURVAS I-V KEITHLEY 2601



Figura 57: Keithley 2601 usado en el PFC

Este medidor lo hemos usado para hacer la caracterización de las placas que posteriormente explicare. Este dispositivo los hemos conectado mediante un cable RS-232 a un ordenador a su puerto serie. Esto lo hacemos porque a este dispositivo lo acompaña un programa que se llama “Test Script Builder” para que lo puedas manejar desde el ordenador.

Este programa viene con un lenguaje de programación el cual hemos adecuado para hacer un programa que nos sirva para nuestro ensayo y así poder caracterizar las placas en vacío entregándonos su máxima potencia.

SENSOR DE TEMPERATURA AD22100KT

Hemos usado este sensor para estudiar como afectaba el temperatura de la sala a las placas solares, y así poder ver si afectaba que hubiera una disminución o incremento al correcto funcionamiento de las placas. Este sensor lo hemos conectado al programa que estaba haciendo una medición constante de las placas. El AD22100 (en nuestro caso es KT) es un sensor de temperatura monolítico en el chip acondicionamiento de señal. Puede trabajar en un rango de temperatura que va de -50°C a 150°C , lo que es ideal para su uso en numerosos HVAC, instrumentación y aplicaciones de automoción. El acondicionamiento de señal elimina la necesidad de ningún recorte, circuitos buffering o linealización, simplificando en gran medida el sistema de diseño y reducir el costo general del sistema.

La tensión de salida es proporcional a los tiempos de temperatura de la tensión de alimentación (radiométrica). Los cambios de salida de 0,25 V a -50°C a 4,75 V a 150°C por medio de un único suministro de 5,0 V.

Debido a su naturaleza radiométrica, la AD22100 ofrece una rentable solución al conectarse a un convertidor de analógico a digital.

□

AD22100—SPECIFICATIONS ($T_A = +25^\circ\text{C}$ and $V_+ = +4\text{ V}$ to $+6\text{ V}$ unless otherwise noted)

Parameter	AD22100K			AD22100A			AD22100S			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
TRANSFER FUNCTION	$V_{\text{OUT}} = (V_+/5\text{ V}) \times [1.375\text{ V} + (22.5\text{ mV}/^\circ\text{C}) \times T_A]$									V
TEMPERATURE COEFFICIENT	$(V_+/5\text{ V}) \times 22.5$									mV/°C
TOTAL ERROR										
Initial Error $T_A = +25^\circ\text{C}$		± 0.5	± 2.0		± 1.0	± 2.0		± 1.0	± 2.0	°C
Error over Temperature $T_A = T_{\text{MIN}}$		± 0.75	± 2.0		± 2.0	± 3.7		± 3.0	± 4.0	°C
$T_A = T_{\text{MAX}}$		± 0.75	± 2.0		± 2.0	± 3.0		± 3.0	± 4.0	°C
Nonlinearity $T_A = T_{\text{MIN}}$ to T_{MAX}			0.5			0.5			1.0	% FS ¹
OUTPUT CHARACTERISTICS										
Nominal Output Voltage $V_+ = 5.0\text{ V}$, $T_A = 0^\circ\text{C}$		1.375								V
$V_+ = 5.0\text{ V}$, $T_A = +100^\circ\text{C}$		3.625								V
$V_+ = 5.0\text{ V}$, $T_A = -40^\circ\text{C}$					0.475					V
$V_+ = 5.0\text{ V}$, $T_A = +85^\circ\text{C}$					3.288					V
$V_+ = 5.0\text{ V}$, $T_A = -50^\circ\text{C}$								0.250		V
$V_+ = 5.0\text{ V}$, $T_A = +150^\circ\text{C}$								4.750		V
POWER SUPPLY										
Operating Voltage	+4.0	+5.0	+6.0	+4.0	+5.0	+6.0	+4.0	+5.0	+6.0	V
Quiescent Current		500	650		500	650		500	650	μA
TEMPERATURE RANGE										
Guaranteed Temperature Range	0		+100	-40		+85	-50		+150	°C
Operating Temperature Range	-50		+150	-50		+150	-50		+150	°C
PACKAGE	TO-92 SOIC			TO-92 SOIC			TO-92 SOIC			

Specifications subject to change without notice.

Figura 58: Datasheet sensor AD22100Kt usado en el PFC

CHIP SPECIFICATIONS ($T_A = +25^\circ\text{C}$ and $V_+ = +5.0\text{ V}$ unless otherwise noted)

Parameter	Min	Typ	Max	Units
TRANSFER FUNCTION	$V_{OUT} = (V_+/5\text{ V}) \times [1.375 + 22.5\text{ mV}/^\circ\text{C} \times T_A]$			V
TEMPERATURE COEFFICIENT	$(V_+/5\text{ V}) \times 22.5$			mV/°C
OUTPUT CHARACTERISTICS				
Error $T_A = +25^\circ\text{C}$		± 0.5	± 2.0	°C
Nominal Output Voltage $T_A = +25^\circ\text{C}$		1.938		V
POWER SUPPLY				
Operating Voltage	+4.0	+5.0	+6.0	V
Quiescent Current		500	650	μA
TEMPERATURE RANGE				
Guaranteed Temperature Range		25		°C
Operating Temperature Range	-50		+150	°C

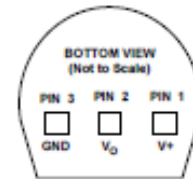
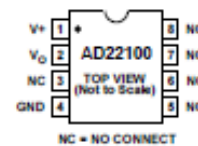
NOTES

¹FS (Full Scale) is defined as that of the operating temperature range, -50°C to $+150^\circ\text{C}$. The listed max specification limit applies to the guaranteed temperature range. For example, the AD22100K has a nonlinearity of $(0.5\%) \times (200^\circ\text{C}) = 1^\circ\text{C}$ over the guaranteed temperature range of 0°C to $+100^\circ\text{C}$. Specifications subject to change without notice.

Figura 59: Datasheet sensor AD22100Kt usado en el PFC

ORDERING GUIDE

Model/Grade	Guaranteed Temperature Range	Package Description*	Package Option
AD22100 KT	0°C to 100°C	TO-92	TO-92
AD22100 KR	0°C to 100°C	SOIC	SO-8
AD22100 AT	-40°C to $+85^\circ\text{C}$	TO-92	TO-92
AD22100 AR	-40°C to $+85^\circ\text{C}$	SOIC	SO-8
AD22100 ST	-50°C to $+150^\circ\text{C}$	TO-92	TO-92
AD22100 SR	-50°C to $+150^\circ\text{C}$	SOIC	SO-8
AD22100KChips	$+25^\circ\text{C}$	N/A	N/A

PIN CONFIGURATIONS
TO-92

SOIC

Figura 60: Datasheet sensor AD22100Kt usado en el PFC

□

Typical Performance Curves

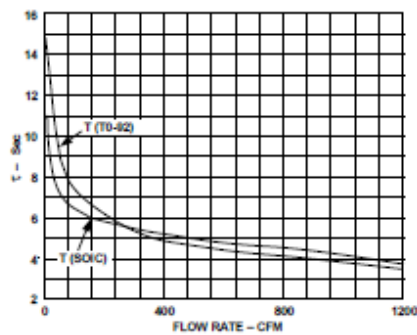


Figure 2. Thermal Response vs. Flow Rate

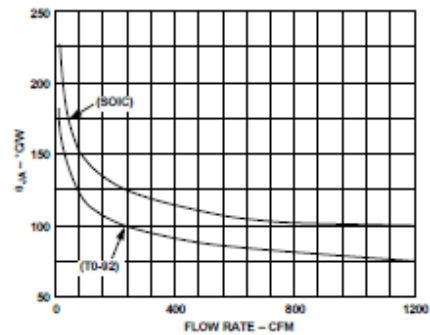


Figure 3. Thermal Resistance vs. Flow Rate

Figura 61: Curvas sensor AD22100Kt usado en el PFC

SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS NI USB 6008/6009 OEM

□

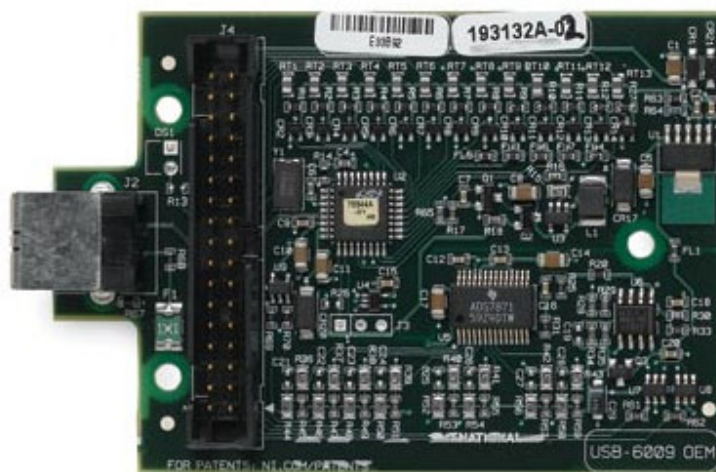


Figura 62: DAC 6009 usado en el PFC

Para poder recoger muestras y así poder evaluar el proceso de degradación necesitamos un DAC. Esto lo conseguimos con el dispositivo de National Instruments 6008/6009, el cual vamos a hacerlo trabajar con un programa que hemos diseñado en LabVIEW. Este dispositivo va conectado con un USB al ordenador.

Las características principales de este dispositivo son las siguientes:

- 8 entradas analógicas (14 bits, 48 kS/s).
- 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s), 12 E/S digitales; contador de 32 bits. Energizado por bus para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada.
- La versión OEM está disponible.
- Compatible con LabVIEW, LabWindows™/CVI y Measurement Studio para Visual Studio .NET.

Nosotros vamos a utilizar cuatro entradas de este dispositivo, que corresponden a las tres placas y una posterior que será para el sensor AD22100KT del que hemos hablado anteriormente.

□

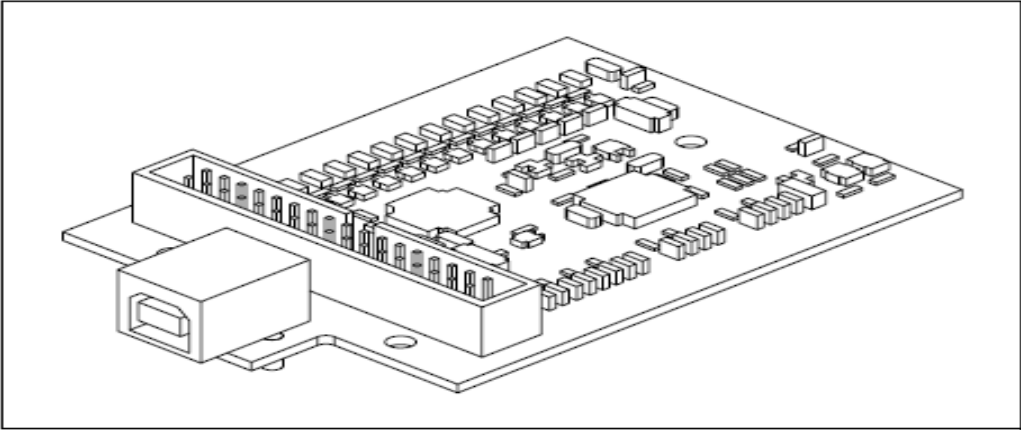


Figura 63: Dispositivo USB-6008/6009 usado en el PFC

A continuación vamos a detallar el pinaje de este dispositivo.

□

+5 V	34	33	PFI 0
D GND	32	31	P1.3
P1.2	30	29	P1.1
P1.0	28	27	P0.7
P0.6	26	25	P0.5
P0.4	24	23	P0.3
P0.2	22	21	P0.1
P0.0	20	19	D GND
LED	18	17	D+
VBUS	16	15	D-
AI GND	14	13	AI GND
AI 4 (AI 0-)	12	11	AI 0 (AI 0+)
AI 5 (AI 1-)	10	9	AI 1 (AI 1+)
AI 6 (AI 2-)	8	7	AI 2 (AI 2+)
AI 7 (AI 3-)	6	5	AI 3 (AI 3+)
AI GND	4	3	AI GND
AO 1	2	1	AO 0

Figura 64: Asignación terminales USB-6008/6009 usado en el PFC

4.2- PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Como hemos explicado anteriormente el procedimiento de ensayo consta de dos partes: caracterización de las células y realización del ensayo acelerado. En este apartado vamos a describir ambas partes. Para poder realizar este ensayo hemos contado con 18 paneles solares. Hemos tenido que hacer una caracterización individual de cada panel para poder encontrar los 3 más parecidos para que nos entreguen la máxima potencia en las mismas condiciones, y de este modo poder analizar la evolución temporal de la potencia de los minimódulos en función de la temperatura

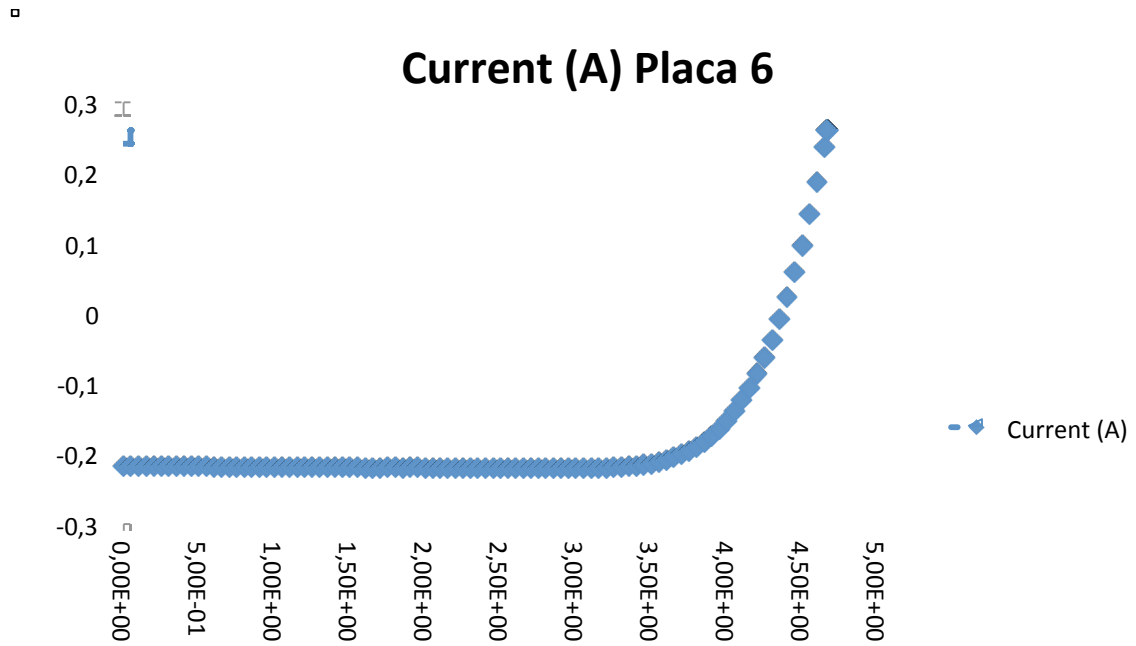
4.2.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS CÉLULAS

Para la caracterización de la curva I/V del módulo fotovoltaico se requiere:

- Un sistema de medida de curvas I/V , Keithley 2601 con el software TSB (Test Script Builder). Este equipo actúa como una carga variable con el objetivo de poder medir la curva I/V de los módulos fotovoltaicos.
- Un foco de 500W que se utilizará exclusivamente para la caracterización de los módulos. El módulo es colocado con respecto al foco de forma que recibe aproximadamente una irradiancia de 1000 W/m^2 . Es necesario la utilización de forma muy repetitiva del foco ya que su iluminación depende de la temperatura.

El procedimiento de la caracterización ha sido el siguiente: Para ello lo que hemos hecho es poner en funcionamiento el programa TSB (Test Script Builder) y lo hacemos funcionar de la siguiente manera, desde 0 a 5V con saltos de 50mV. Previamente hemos ajustado la placa solar en paralelo con el Foco de 500W y a una distancia de 30cm. El foco previamente ha estado encendido del orden de 20 minutos para que esté estabilizado en temperatura. Hemos ajustado el foco para que estando en cortocircuito y la placa fría nos entregara el valor de I_{sc} del catalogo que sería aproximadamente 230mA. Esto lo fuimos haciendo con cada una de las 18 placas. Este programa nos volcaba los datos en un Excel que posteriormente valoraremos cual era su máxima potencia para poder colocarle una carga y poder encontrar los tres más parecidos.

Aunque se han caracterizado los 18 módulos fotovoltaicos se han seleccionado los tres que tienen la curva I-V más parecida en la Potencia máxima. A continuación mostro los valores de las tres placas mas parecidas que corresponden a las placas 6, 10 y 11. Las tablas muestran los valores de la curva I/V con el objetivo de que se pueda observar su similitud.



Gráfica 1 : Corriente placa 6

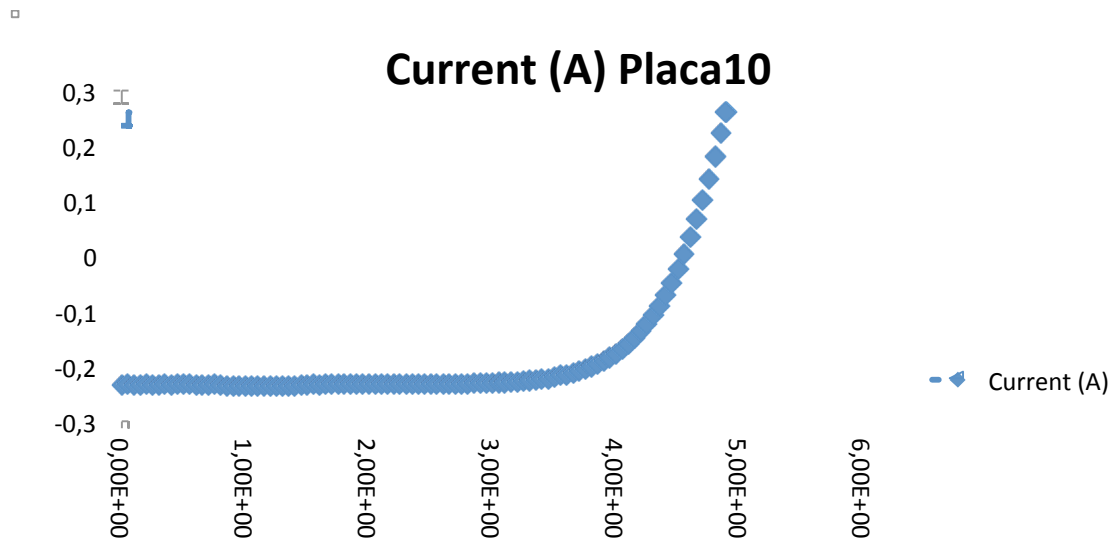
En la placa 6 podemos ver que la máxima potencia que nos va a entregar son 0,75w con una resistencia de 17,23Ω. Que posteriormente ajustaremos a un valor comercial.

Placa 6

Voltage (V)	Current (A)	P=VxI	Pmax
8,64E-06	-0,21766	1,88117E-06	0,752231572
0,050011	-0,21768	0,010886394	R máxima
0,10001	-0,21799	0,02180118	17,23256593
0,15006	-0,2179	0,032698074	
0,20008	-0,21775	0,04356742	
0,25007	-0,21802	0,054520261	
0,30009	-0,21828	0,065503645	
0,35008	-0,2185	0,07649248	
0,40009	-0,21818	0,087291636	
0,45008	-0,21823	0,098220958	
0,5001	-0,21833	0,109186833	
0,55011	-0,21837	0,120127521	
0,60009	-0,21883	0,131317695	
0,6501	-0,21887	0,142287387	
0,7001	-0,21879	0,153174879	
0,7501	-0,21883	0,164144383	
0,80009	-0,21903	0,175243713	
0,8501	-0,21893	0,186112393	
0,90008	-0,21888	0,19700951	
0,95009	-0,21878	0,20786069	
1,0002	-0,21899	0,219033798	
1,0502	-0,21928	0,230287856	
1,1002	-0,21921	0,241174842	
1,1502	-0,21949	0,252457398	
1,2002	-0,2194	0,26332388	
1,2502	-0,21949	0,274406398	
1,3002	-0,21943	0,285302886	
1,3502	-0,21928	0,296071856	
1,4002	-0,21939	0,307189878	
1,4502	-0,21932	0,318057864	
1,5002	-0,21927	0,328948854	
1,5502	-0,21949	0,340253398	
1,6002	-0,21953	0,351291906	
1,6502	-0,21961	0,362400422	
1,7002	-0,21952	0,373227904	
1,7502	-0,21947	0,384116394	
1,8003	-0,21944	0,395057832	
1,8503	-0,21953	0,406196359	
1,9003	-0,21944	0,417001832	
1,9503	-0,21942	0,427934826	
2,0003	-0,21988	0,439825964	
2,0503	-0,22008	0,451230024	
2,1003	-0,22021	0,462507063	
2,1503	-0,22027	0,473646581	
2,2003	-0,22038	0,484902114	

2,2503	-0,22008	0,495246024
2,3003	-0,21969	0,505352907
2,3503	-0,21973	0,516431419
2,4003	-0,21977	0,527513931
2,4503	-0,21987	0,538747461
2,5003	-0,22007	0,550241021
2,5503	-0,22024	0,561678072
2,6004	-0,22011	0,572374044
2,6504	-0,2201	0,58335304
2,7004	-0,22015	0,59449306
2,7504	-0,22022	0,605693088
2,8004	-0,22038	0,617152152
2,8504	-0,21995	0,62694548
2,9004	-0,22015	0,63852306
2,9504	-0,21993	0,648881472
3,0004	-0,21975	0,6593379
3,0504	-0,22002	0,671149008
3,1004	-0,21994	0,681901976
3,1504	-0,22	0,693088
3,2004	-0,21951	0,702519804
3,2504	-0,21931	0,712845224
3,3004	-0,21868	0,721731472
3,3504	-0,21805	0,73055472
3,4004	-0,21686	0,737410744
3,4504	-0,21567	0,744147768
3,5004	-0,21403	0,749190612
3,5504	-0,21179	0,751939216
3,6004	-0,20893	0,752231572
3,6504	-0,20541	0,749828664
3,7004	-0,20126	0,744742504
3,7504	-0,19636	0,736428544
3,8005	-0,19041	0,723653205
3,8505	-0,18337	0,706066185
3,9004	-0,17496	0,682413984
3,9503	-0,16471	0,650653913
4,0003	-0,15311	0,612485933
4,0503	-0,13952	0,565097856
4,1003	-0,12398	0,508355194
4,1503	-0,10636	0,441425908
4,2003	-0,086136	0,361797041
4,2503	-0,063654	0,270548596
4,3003	-0,037971	0,163286691
4,3503	-0,0087978	0,038273069
4,4003	0,02326	-0,102350978
4,4504	0,058067	-0,258421377
4,5004	0,096375	-0,43372605
4,5503	0,14077	-0,640545731

4,6003	0,18643	-0,857633929
4,6503	0,2361	-1,09793583
4,6711	0,26004	-1,214672844
4,6691	0,26004	-1,214152764
4,6673	0,26004	-1,213684692
4,6656	0,26004	-1,213242624
4,6638	0,26004	-1,212774552
4,6621	0,26004	-1,212332484



Gráfica 2 : Corriente placa 10

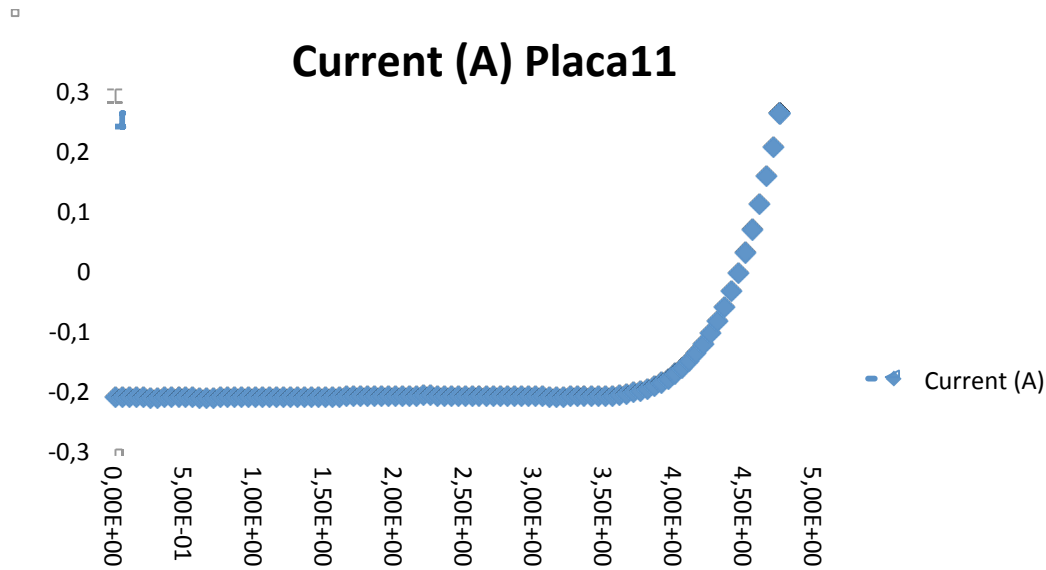
En la placa 10 podemos ver que la máxima potencia que nos va a entregar son 0,77w con un resistencia de 16,95Ω. Que posteriormente ajustaremos a un valor comercial.

Placa 10

Voltage (V)	Current (A)	P=VxI	Pmax
1,50E-05	-0,23381	3,50902E-06	0,77552616
0,050016	-0,23368	0,011687739	Rmax=16.95
0,10002	-0,23389	0,023393678	
0,15006	-0,23387	0,035094532	
0,20008	-0,23364	0,046746691	
0,25007	-0,23389	0,058488872	
0,30008	-0,23394	0,070200715	
0,35008	-0,23371	0,081817197	
0,40009	-0,23398	0,093613058	
0,45008	-0,23371	0,105188197	
0,5001	-0,23366	0,116853366	
0,55011	-0,23376	0,128593714	
0,6001	-0,2339	0,14036339	

0,65011	-0,23386	0,152034725
0,7001	-0,23386	0,163725386
0,75011	-0,2332	0,174925652
0,8001	-0,23407	0,187279407
0,85011	-0,23538	0,200098892
0,90009	-0,23558	0,212043202
0,95009	-0,23551	0,223755696
1,0002	-0,23568	0,235727136
1,0502	-0,23539	0,247206578
1,1002	-0,23529	0,258866058
1,1502	-0,2351	0,27041202
1,2002	-0,2352	0,28228704
1,2502	-0,23548	0,294397096
1,3002	-0,23506	0,305625012
1,3502	-0,2351	0,31743202
1,4002	-0,23508	0,329159016
1,4502	-0,23481	0,340521462
1,5002	-0,23424	0,351406848
1,5502	-0,2333	0,36166166
1,6002	-0,23379	0,374110758
1,6502	-0,23332	0,385024664
1,7002	-0,23324	0,396554648
1,7502	-0,23329	0,408304158
1,8003	-0,23341	0,420208023
1,8503	-0,23313	0,431360439
1,9003	-0,23304	0,442845912
1,9503	-0,23292	0,454263876
2,0003	-0,23293	0,465929879
2,0503	-0,23303	0,477781409
2,1003	-0,23297	0,489306891
2,1503	-0,23262	0,500202786
2,2003	-0,23293	0,512515879
2,2503	-0,23298	0,524274894
2,3003	-0,23286	0,535647858
2,3503	-0,23286	0,547290858
2,4003	-0,2328	0,55878984
2,4503	-0,23274	0,570282822
2,5003	-0,23266	0,581719798
2,5503	-0,23255	0,593072265
2,6004	-0,23257	0,604775028
2,6504	-0,23241	0,615979464
2,7004	-0,23183	0,626033732
2,7504	-0,2317	0,63726768
2,8004	-0,23164	0,648684656
2,8504	-0,23122	0,659069488
2,9004	-0,23091	0,669731364
2,9504	-0,23076	0,680834304

3,0004	-0,23062	0,691952248	
3,0504	-0,22995	0,70143948	
3,1004	-0,22929	0,710890716	
3,1504	-0,22879	0,720780016	
3,2004	-0,22823	0,730427292	
3,2504	-0,22718	0,738425872	
3,3004	-0,22639	0,747177556	
3,3504	-0,22518	0,754443072	
3,4004	-0,22397	0,761587588	
3,4504	-0,22239	0,767334456	
3,5004	-0,22025	0,7709631	
3,5504	-0,21677	0,769620208	R max
3,6004	-0,2154	0,77552616	16,95981912
3,6504	-0,21229	0,774943416	
3,7004	-0,20904	0,773531616	
3,7504	-0,20538	0,770257152	
3,8004	-0,20097	0,763766388	
3,8504	-0,19619	0,755409976	
3,9003	-0,19057	0,743280171	
3,9503	-0,18426	0,727882278	
4,0003	-0,17691	0,707693073	
4,0503	-0,16891	0,684136173	
4,1003	-0,15975	0,655022925	
4,1503	-0,14928	0,619556784	
4,2004	-0,13726	0,576546904	
4,2503	-0,12363	0,525464589	
4,3003	-0,10789	0,463959367	
4,3503	-0,090477	0,393602093	
4,4003	-0,070839	0,311712852	
4,4503	-0,048957	0,217873337	
4,5003	-0,024587	0,110648876	
4,5504	0,0027538	-0,012530892	
4,6004	0,034085	-0,156804634	
4,6504	0,065927	-0,306586921	
4,7003	0,1016	-0,47755048	
4,7503	0,1391	-0,66076673	
4,8003	0,17963	-0,862277889	
4,8503	0,22222	-1,077833666	
4,8902	0,26004	-1,271647608	
4,8881	0,26003	-1,271052643	



Gráfica 3 : Corriente placa 11

En la placa 11 podemos ver que la máxima potencia que nos va a entregar son 0,60w con un resistencia de 18,52Ω. Que posteriormente ajustaremos a un valor comercial.

Placa 11

Voltage (V)	Current (A)	P=VxI	Pmax
5,57E-06	-0,21237	1,18229E-06	0,593944912
0,050009	-0,21257	0,010630413	Rmax=18.52
0,10001	-0,2125	0,021252125	
0,15006	-0,21266	0,03191176	
0,20007	-0,21337	0,042688936	
0,25006	-0,21402	0,053517841	
0,30008	-0,2141	0,064247128	
0,35008	-0,21268	0,074455014	
0,40008	-0,213	0,08521704	
0,45008	-0,21322	0,095966058	
0,50009	-0,21312	0,106579181	
0,5501	-0,21298	0,117160298	
0,60009	-0,21404	0,128443264	
0,65011	-0,2142	0,139253562	
0,7001	-0,21421	0,149968421	
0,7501	-0,21306	0,159816306	
0,80009	-0,21307	0,170475176	
0,8501	-0,21281	0,180909781	
0,90008	-0,21272	0,191465018	
0,95009	-0,21343	0,202777709	
1,0002	-0,2133	0,21334266	
1,0502	-0,21349	0,224207198	
1,1002	-0,21235	0,23362747	

1,1502	-0,21224	0,244118448
1,2002	-0,21184	0,254250368
1,2502	-0,21301	0,266305102
1,3002	-0,21325	0,27726765
1,3502	-0,21285	0,28739007
1,4002	-0,21218	0,297094436
1,4502	-0,21236	0,307964472
1,5002	-0,21268	0,319062536
1,5502	-0,21295	0,33011509
1,6002	-0,21267	0,340314534
1,6502	-0,21156	0,349116312
1,7002	-0,21157	0,359711314
1,7502	-0,21151	0,370184802
1,8003	-0,21149	0,380745447
1,8503	-0,21135	0,391060905
1,9003	-0,21122	0,401381366
1,9503	-0,21125	0,412000875
2,0003	-0,21101	0,422083303
2,0503	-0,2113	0,43322839
2,1003	-0,21137	0,443940411
2,1503	-0,21148	0,454745444
2,2003	-0,21021	0,462525063
2,2503	-0,21019	0,472990557
2,3003	-0,21105	0,485478315
2,3503	-0,21129	0,496594887
2,4003	-0,21061	0,505527183
2,4503	-0,21107	0,517184821
2,5003	-0,21098	0,527513294
2,5503	-0,2112	0,53862336
2,6003	-0,21115	0,549053345
2,6503	-0,21156	0,560697468
2,7004	-0,21138	0,570810552
2,7503	-0,21145	0,581550935
2,8004	-0,21115	0,59130446
2,8504	-0,21143	0,602660072
2,9003	-0,21157	0,613616471
2,9503	-0,2116	0,62428348
3,0004	-0,21133	0,634074532
3,0504	-0,21127	0,644458008
3,1004	-0,21163	0,656137652
3,1504	-0,21163	0,666719152
3,2004	-0,21167	0,677428668
3,2504	-0,21133	0,686907032
3,3004	-0,21132	0,697440528
3,3504	-0,21132	0,708006528
3,4004	-0,21137	0,718742548
3,4504	-0,21143	0,729518072

3,5004	-0,21103	0,738689412	
3,5504	-0,21059	0,747678736	
3,6004	-0,20967	0,754895868	
3,6504	-0,20792	0,758991168	
3,7004	-0,20478	0,757767912	
3,7504	-0,20259	0,759793536	R máx
3,8004	-0,19915	0,75684966	18,51226615
3,8504	-0,19461	0,749326344	
3,9003	-0,18903	0,737273709	
3,9503	-0,18204	0,719112612	
4,0003	-0,17362	0,694532086	
4,0503	-0,16432	0,665545296	
4,1003	-0,15309	0,627714927	
4,1503	-0,13954	0,579132862	
4,2003	-0,12442	0,522601326	
4,2503	-0,10657	0,452954471	
4,3003	-0,086269	0,370982581	
4,3503	-0,063113	0,274560484	
4,4003	-0,036635	0,161204991	
4,4503	-0,006413	0,028539774	
4,5004	0,02791	-0,125606164	
4,5504	0,066403	-0,302160211	
4,6003	0,10864	-0,499776592	
4,6503	0,15418	-0,716983254	
4,7003	0,20406	-0,959143218	
4,7499	0,25837	-1,227231663	
4,7483	0,26003	-1,234700449	
4,7461	0,26003	-1,234128383	
4,7441	0,26002	-1,233560882	
4,7421	0,26003	-1,233088263	

Una vez realizado el banco de medidas de las curvas I/V en iluminación, la selección de los módulos y su caracterización se ha procedido a la realización del ensayo acelerado.

Foco con la placa



Figura 65: Foco con la placa usada

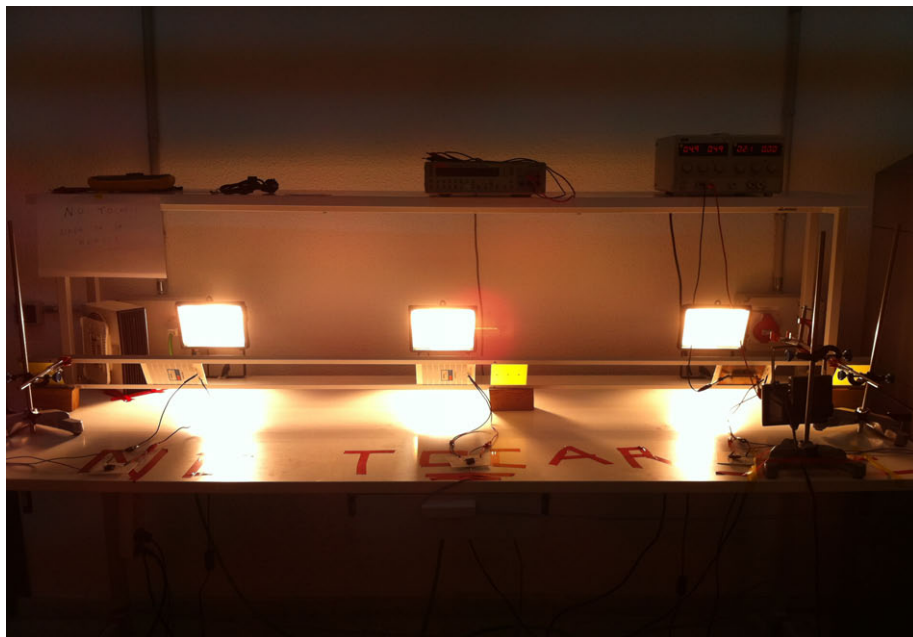
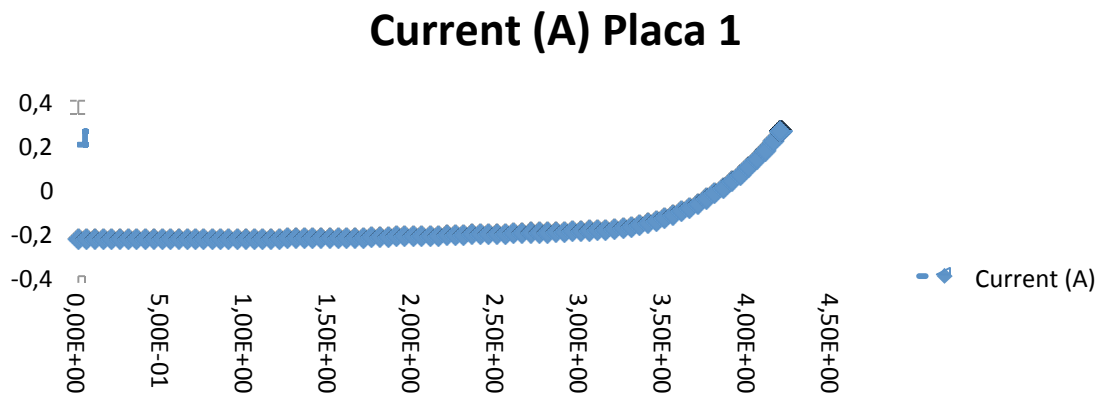


Figura 66: Banco de pruebas donde se realiza el ensayo

4.3- CARACTERIZACIÓN DE LA ILUMINACIÓN

Después de haber ubicado en una estructura las placas tal y como las vemos en la foto de arriba, exactamente paralelas al foco y a una distancia en la cual vamos a poder tenerlas a diferentes temperaturas, usamos la placa 1 que es de referencia para que los tres focos tengan la misma irradiancia y en el ensayo haremos que tengan diferentes temperaturas. Con esta placa que tiene la siguiente curva y las siguientes medidas

□



Gráfica 4 : Corriente placa 1

Placa 1

Voltage (V)	Current (A)	P=VxI	Pmax
9,19E-06	-0,23014	2,11522E-06	0,59394491
5,00E-02	-0,23045	0,011525265	Rmax=16.710
0,10001	-0,23035	0,023037304	
0,15007	-0,23042	0,034579129	
0,20008	-0,23048	0,046114438	
0,25007	-0,23083	0,057723658	
0,30009	-0,23063	0,069209757	
0,35008	-0,2306	0,080728448	
0,40009	-0,23061	0,092264755	
0,45009	-0,2305	0,103745745	
0,5001	-0,23062	0,115333062	
0,55011	-0,23021	0,126640823	
0,6001	-0,23037	0,138245037	
0,65011	-0,2305	0,149850355	
0,7001	-0,23066	0,161485066	
0,75011	-0,23048	0,172885353	
0,8001	-0,23027	0,184239027	
0,85011	-0,22999	0,195516799	
0,90009	-0,23	0,2070207	
0,9501	-0,23026	0,218770026	
1,0002	-0,22995	0,22999599	
1,0502	-0,22986	0,241398972	
1,1002	-0,2298	0,25282596	
1,1502	-0,23011	0,264672522	
1,2002	-0,22974	0,275733948	
1,2502	-0,22919	0,286533338	
1,3002	-0,22864	0,297277728	
1,3502	-0,22796	0,307791592	
1,4003	-0,22773	0,318890319	
1,4503	-0,22709	0,329348627	

1,5003	-0,22664	0,340027992	
1,5503	-0,22578	0,350026734	
1,6003	-0,22517	0,360339551	
1,6503	-0,22411	0,369848733	
1,7003	-0,22345	0,379932035	
1,7503	-0,2226	0,38961678	
1,8003	-0,2216	0,39894648	
1,8503	-0,2207	0,40836121	
1,9003	-0,22008	0,418218024	
1,9503	-0,21949	0,428071347	
2,0003	-0,2186	0,43726558	
2,0503	-0,21747	0,445878741	
2,1003	-0,21635	0,454399905	
2,1503	-0,21541	0,463196123	
2,2003	-0,2142	0,47130426	
2,2503	-0,2133	0,47998899	
2,3003	-0,21224	0,488215672	
2,3503	-0,21098	0,495866294	
2,4003	-0,21036	0,504927108	
2,4503	-0,20905	0,512235215	
2,5003	-0,20782	0,519612346	
2,5503	-0,20667	0,527070501	
2,6004	-0,2043	0,53126172	
2,6504	-0,20353	0,539435912	
2,7004	-0,20274	0,547479096	
2,7504	-0,20165	0,55461816	
2,8004	-0,20015	0,56050006	
2,8504	-0,19859	0,566060936	
2,9004	-0,19721	0,571987884	
2,9504	-0,19566	0,577275264	
3,0004	-0,19419	0,582647676	
3,0504	-0,19317	0,589245768	
3,1004	-0,19106	0,592362424	R máxima
3,1504	-0,18853	0,593944912	16,71033788
3,2004	-0,18541	0,593386164	
3,2504	-0,18087	0,587899848	
3,3004	-0,17455	0,57608482	
3,3504	-0,16721	0,560220384	
3,4004	-0,15829	0,538249316	
3,4504	-0,14772	0,509693088	
3,5004	-0,13616	0,476614464	
3,5504	-0,12195	0,43297128	
3,6004	-0,10604	0,381786416	
3,6504	-0,089549	0,32688967	
3,7004	-0,06979	0,258250916	
3,7504	-0,048087	0,180345485	
3,8005	-0,024045	0,091383023	

3,8505	0,0020958	-0,008069878
3,9004	0,031064	-0,121162026
3,9504	0,062107	-0,245347493
4,0004	0,096184	-0,384774474
4,0503	0,1337	-0,54152511
4,1003	0,17335	-0,710787005
4,1503	0,21608	-0,896796824
4,1977	0,26	-1,091402
4,1968	0,26004	-1,091335872
4,1959	0,26004	-1,091101836
4,1952	0,26004	-1,090919808
4,1944	0,26004	-1,090711776
4,1939	0,26004	-1,090581756
4,1933	0,26004	-1,090425732
4,192	0,26004	-1,09008768
4,1916	0,26004	-1,089983664
4,191	0,26004	-1,08982764
4,1904	0,26003	-1,089629712
4,1899	0,26002	-1,089457798
4,1894	0,26002	-1,089327788
4,1889	0,26002	-1,089197778
4,1883	0,26002	-1,089041766
4,1872	0,26002	-1,088755744

Para ajustar la temperatura del módulo utilizamos el propio módulo como sensor de temperatura. Para ello consideramos que la V_{oc} del módulo fotovoltaico depende de forma muy predominante de la temperatura. Utilizamos los datos del datasheet la relación entre la tensión con la temperatura. En el datasheet encontramos que cada celda $-2,3 \frac{mV}{^{\circ}C}$. Como tenemos un total de 8 celdas en serie tenemos $-18,4 \frac{mV}{^{\circ}C}$.

Vamos anotando los valores hasta que consigamos estabilizarla, esto lo conseguiremos cuando la V_{oc} haya disminuido y la I_{sc} aumente hasta la estabilización.

V_{oc}	Tiempo	Temperatura $^{\circ}C$
4,721	11:22	35
4,503	11:23	37
4,377	11:24	39
4,303	11:25	42
4,229	11:26	45
4,174	11:27	52
4,133	11:28	54
4,086	11:29	56
4,050	11:30	60
4,016	11:31	64
3,999	11:32	66
3,988	11:33	66

3,965	11:34	66
3,951	11:35	67
3,939	11:36	67
3,930	11:37	68
3,922	11:38	68
3,915	11:39	69
3,899	11:43	70
3,893	11:48	72
3,889	11:48	73
3,882	11:57	73



Figura 67: V_{oc} estable



Figura 68: Panel calentando el foco

Ahora vamos a medir la máxima I_{sc} , para ello ponemos el amperímetro en serie sin carga ver la máxima I_{sc} que en este caso es 287mA, y la foto de la V_{oc} estable.

Habitualmente los módulos fotovoltaicos se les hace funcionar en el punto de máxima potencia por lo que en nuestro ensayo acelerado los módulos funcionaran en el punto de máxima potencia. Ahora lo que no queda por hacer es ajustar el punto de máxima potencia para esta placa de referencia, y habiendo hecho esto tendremos ajustada la placa en el punto donde nos entregara su máxima potencia con su máximo nivel de irradiación del foco. Para ello pondremos una resistencia en serie con la placa, unido en serie estará el amperímetro y en paralelo con la resistencia pondremos el voltímetro para ir ajustando hasta que no varíe la I_{sc} , y cuando ocurra eso tendremos ajustada la resistencia con la máxima potencia que nos puede entregar la placa. Se utilizarán diferentes resistencias hasta obtener el punto de máxima potencia como puede observarse en la siguiente tabla. La I_{sc} , es observada con el objetivo de controlar el nivel de irradiancia.

Resistencia en Ohmios	V x I	Potencia en watos
11	2,735 x 0,237	0,65
12	2,9 x 0,232	0,6728
13	3,07 x 0,227	0,6968
14	3,217 x 0,220	0,705
15	3,307 x 0,212	0,7010
16	3,373 x 0,203	0,68471
17	3,423 x 0,195	0,66

Como podemos comprobar con estos datos es que tenemos la máxima potencia que es 0,71w con una resistencia de 14 Ω .

I_{sc}

V_{oc}

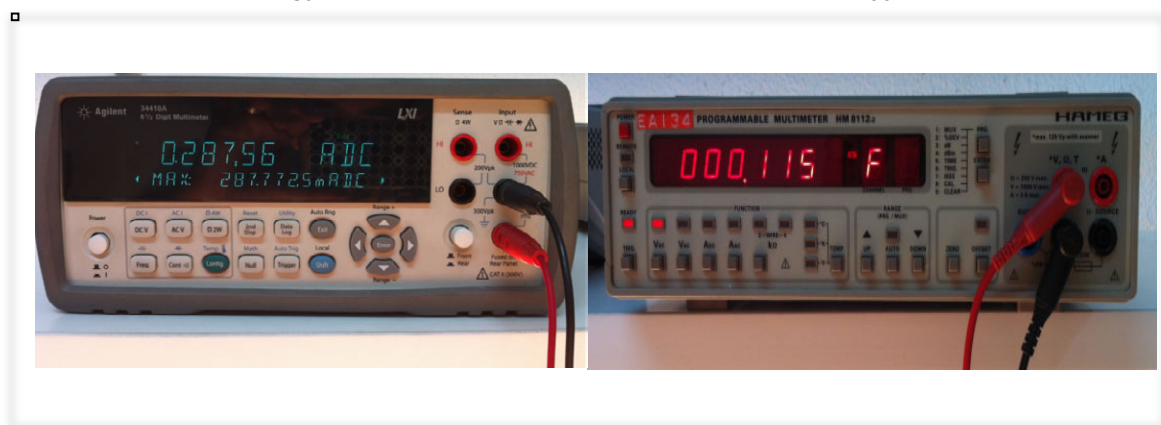


Figura 69: I_{sc} y V_{oc} estable

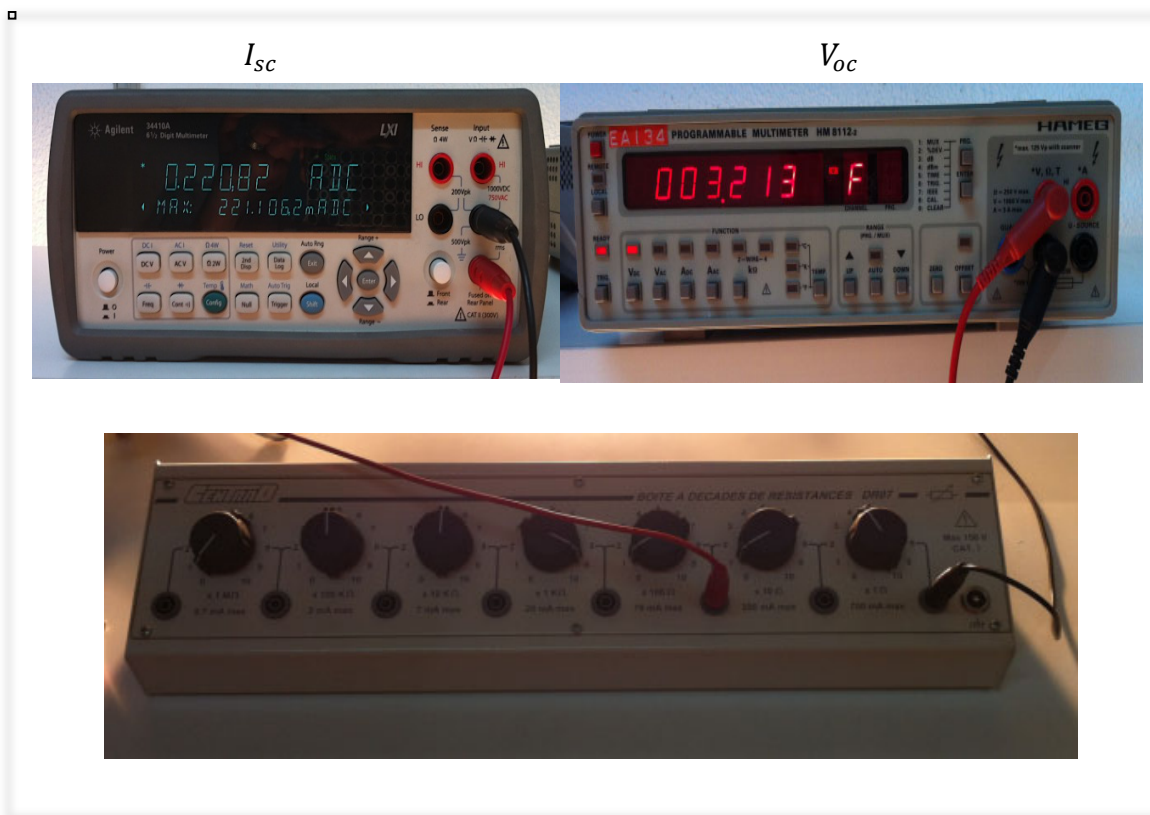


Figura 70: Amperímetro, Voltímetro, y resistencia usada

4.4- CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO

Una vez controlados el nivel de irradiancia y el punto de máxima potencia vamos a describir como conseguir los diferentes niveles de temperatura y el punto de máxima potencia de cada módulo ya que también depende de la temperatura y de cada módulo.

Hemos colocado las tres placas seleccionadas que corresponden a las placas número 6, 10 y 11 de izquierda a derecha.



Figura 71: Banco de pruebas del proyecto

Estas placas las hemos colocado a diferentes temperaturas y las hemos puesto para que nos entreguen la máxima potencia.

Para ajustar la temperatura hemos mirado el datasheet de la placa que nos dice que tiene un coeficiente de temperatura de V_{oc} : $-0.36\%/K$. Con estos datos ajustamos mediante las siguientes operaciones matemáticas cada placa con su temperatura ideal.

Primero sabemos que a la temperatura de la sala que son $24^{\circ}C$ las tres placas tienen las siguientes V_{oc} :

$$V_{ocplaca\ 6} = 4,7976\ v$$

$$V_{ocplaca\ 10} = 4,8945\ v$$

$$V_{ocplaca\ 11} = 4,7576\ v$$

Después de tener estos datos aplicamos lo siguiente:

$$\frac{V_{oc\ 24^{\circ}\text{C}} - V_{oc\ T^{\circ}\text{C deseada}}}{V_{oc\ 24^{\circ}\text{C}}} \times 100 = \Delta T \%$$

Como sabemos que: 0,36 % -----> 1°C

x ΔT % -----> grados que queremos en la placa

Queremos poner las placas a las siguientes temperaturas 60°C, 72°C y 84°C. Para ello y aplicando las formulas anteriormente descritas llegamos a los siguientes valores:

$V_{oc\text{placa } 6} = 4,180\text{ v} \text{ -----> } 60^{\circ}\text{C}$

$V_{oc\text{placa } 10} = 4,030\text{ v} \text{ -----> } 72^{\circ}\text{C}$

$V_{oc\text{placa } 11} = 3,730\text{ v} \text{ -----> } 84^{\circ}\text{C}$

4.4.1. TRES TEMPERATURAS DIFERENTES

Una vez que hemos calculado a que temperatura debe estar cada foco pasamos a colocar las tres placas en sus posiciones definitivas, empezamos por la placa de la izquierda que corresponde con la placa numero 6, esta placa estará a una temperatura de 60 °C para ello tiene que estar con una $V_{oc\text{placa } 6} = 4,180\text{ v}$. Esta temperatura la conseguimos refrigerando la placa con un ventilador tal y como se ve en la fotografía. Tenemos que angular el ventilador para conseguir los 4,180 v. Este ventilador estará conectado durante todo el tiempo que dure el ensayo.



Figura 72: Ventilador usado para refrigerar la placa fotovoltaica

La placa del centro que corresponde con la placa número 10 no la necesitamos poner nada ya que hemos calculado la temperatura a la que queremos poner la placa que son

72 °C, lo hemos hecho alejando y acercando el foco hasta que nos dio los $V_{ocplaca\ 10}=4,030\text{ v}$.

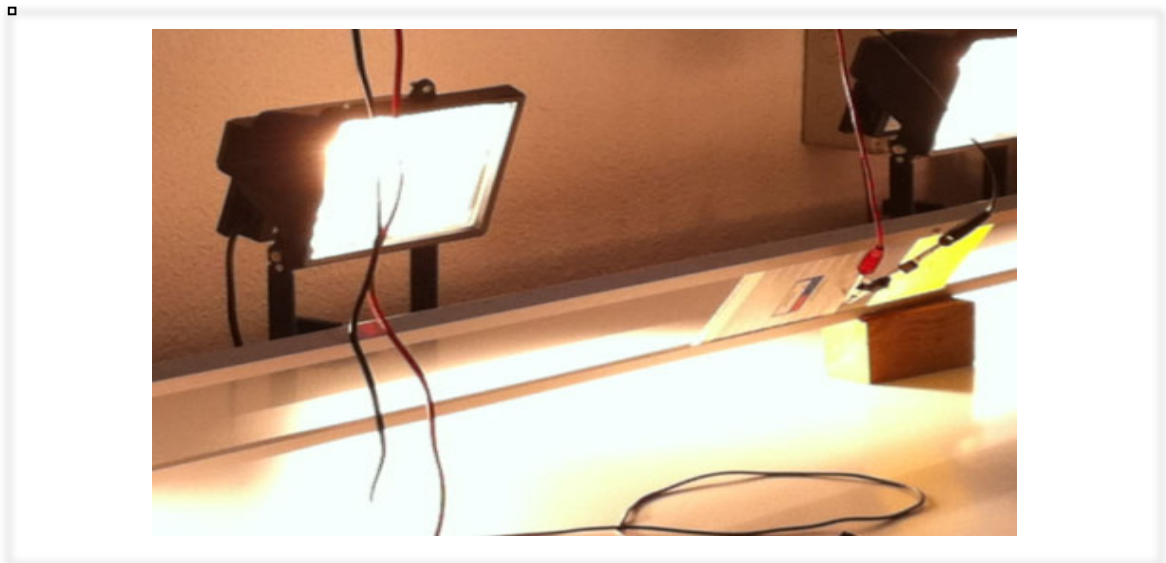


Figura 73: Foco calentando la placa fotovoltaica del centro

La placa de la derecha la hemos querido poner a 84 °C, según el datasheet el límite de estas placas son 85 °C pero para evitar romperlas desde el principio hemos decidido bajarlas 1 °C. Esta temperatura que corresponde con $V_{ocplaca\ 11}=3,730\text{ v}$, lo hemos conseguido adheriendo una resistencia en la placa por detrás por la que se hace pasar corriente para calentarla. De esta forma controlando el voltaje que se le hace pasar a la resistencia podemos controlar la temperatura del módulo. La resistencia se ha calentado con una potencia de 2,5 w con un generador de corriente continua tal y como vemos en la foto.



Figura 74: Foco con la resistencia y la alimentación usada para calentar la placa fotovoltaica

4.4.2. CÉLULAS EN SU PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA

Después de conseguir ajustar las células a la temperatura ideada las hemos puesto una carga para que cada célula nos entregue su máxima potencia.

Para la célula número 6 es decir la que está a la izquierda le hemos puesto una carga de $13,18 \Omega$.

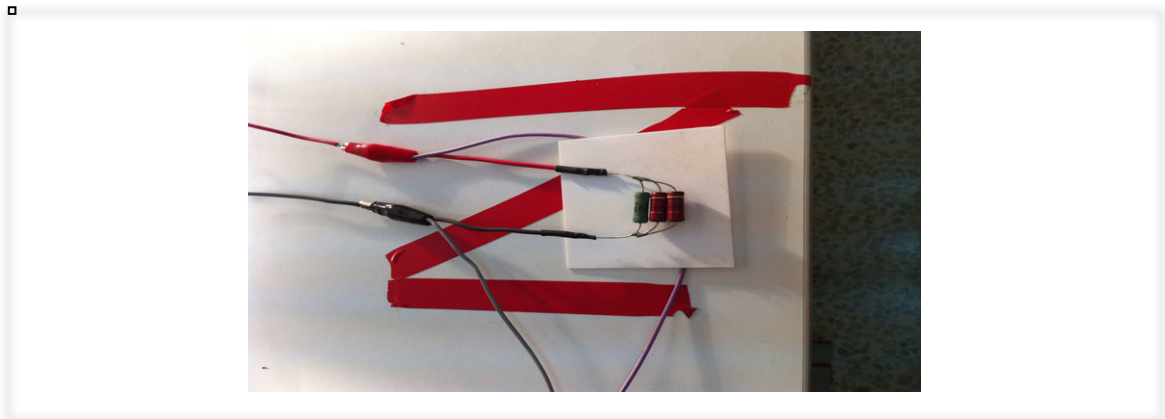


Figura 75: Resistencia usada

La placa del centro, 72°C , que corresponde con la placa numero 10 le hemos puesto una carga de $12,86 \Omega$.

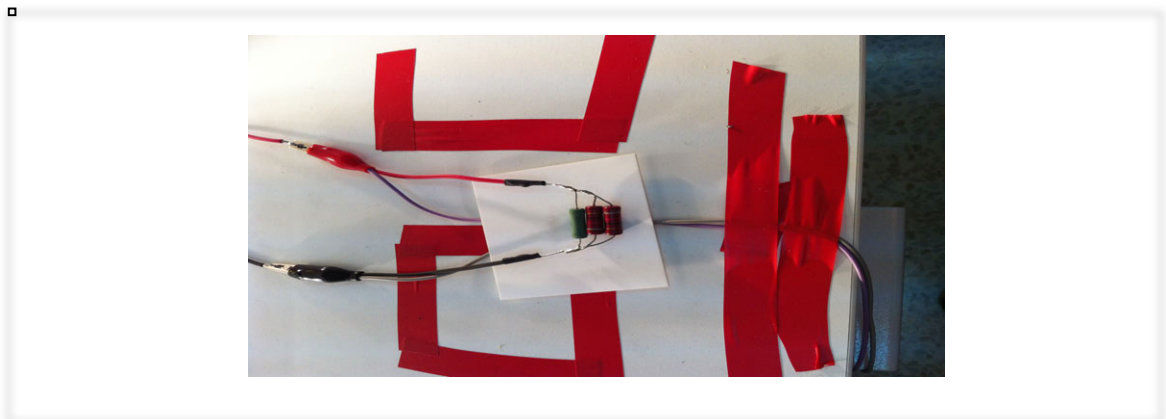


Figura 76: Resistencia usada

La placa que esta más a la derecha que corresponde con la placa numero 11 le hemos puesto una carga de $11,39 \Omega$.

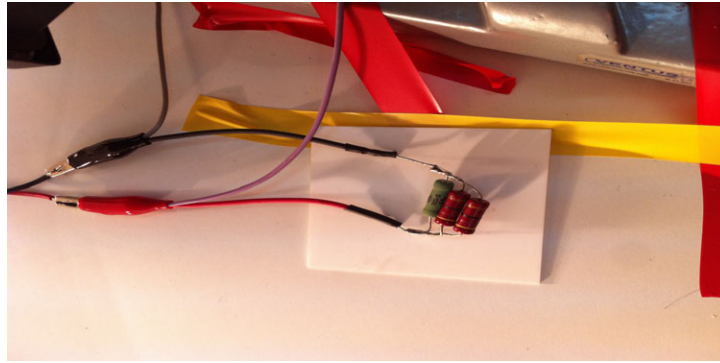


Figura 77: Resistencia usada

4.4.3. MEDIDA CONTINUA DE TENSIÓN

Para poder ver la degradación de las placas in situ durante el ensayo hemos desarrollado un programa en LabView el cual hemos conectado un sistema de adquisición de datos (DAC) que ira midiendo cada hora la tensión en el punto de máxima potencia de las tres placas, estos datos nos los vuelca a un archivo en Excel para poder trabajar con él. Además también medirá la temperatura de la sala para ver como afecta en la tensión y como se degradan las placas.



Figura 78: Banco de pruebas completo

Programa LabVIEW

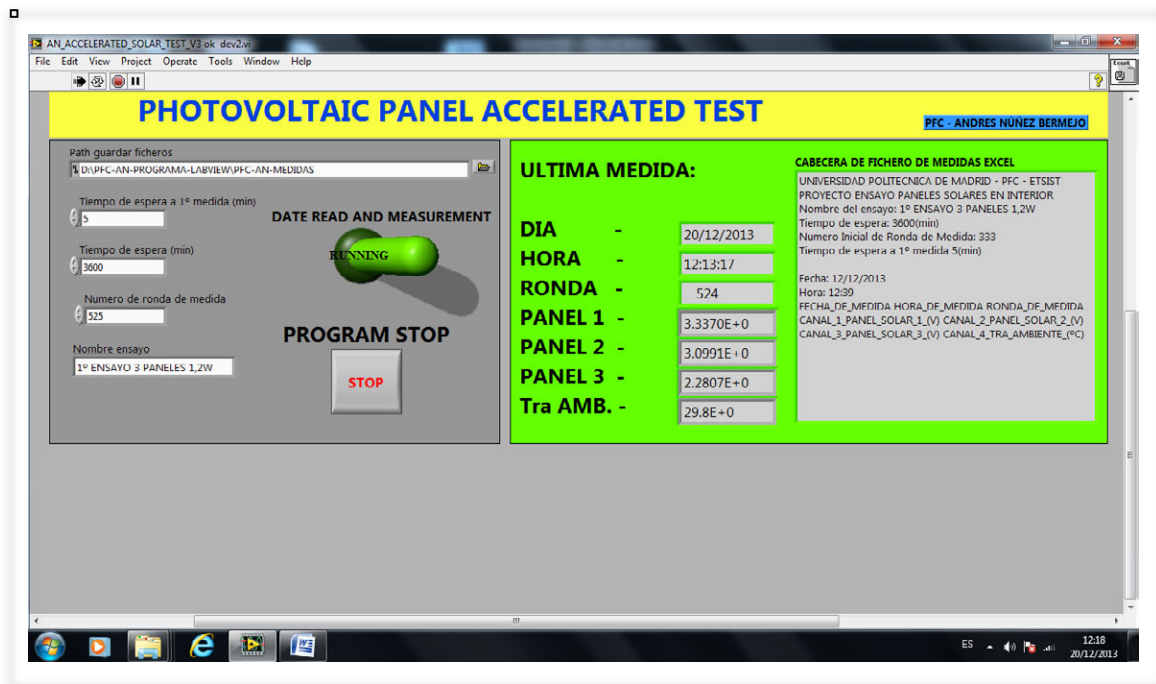


Figura 79: Programa creado en LabView

4.5- CONCLUSIONES TEMA 4

En este capítulo tema hemos descrito los dos bancos de pruebas para la realización de los ensayos acelerados:

- Comenzamos describiendo el entorno donde desarrollaremos el proyecto desde los equipos, componentes o programas que han sido necesarios a lo largo del desarrollo del PFC.
- Luego pasamos a explicar como hemos caracterizado las células para escoger las tres mas parecidas con las que haremos los ensayos acelerados.
- Para finalizar hemos montado el banco de pruebas con las tres placas solares fotovoltaicas escogidas, hemos ajustado las condiciones de funcionamiento poniendo cada placa con un salto de 12 °C quedando de la siguiente manera:
 - Placa numero 6 a 60 °C
 - Placa numero 10 a 72 °C
 - Placa numero 11 a 84 °C

Una vez finalizado el montaje se procedió al comienzo del ensayo.

TEMA 5 – RESULTADOS

Los módulos fotovoltaicos han sido puestos en funcionamiento en el banco de pruebas a las tres temperaturas diferentes. Después de tener las placas trabajando en su punto máxima potencia durante 520 horas que equivalen a 21 días y 6 horas hemos comprobado como la tercera placa que es la que estaba a 84°C, muy cerca de la temperatura máxima según el datasheet ha empezado a degradarse. A continuación muestro los resultados:

Fecha	Hora	Nº Ronda	Panel 6	Panel 10	Panel 11	Tª sala
28/11/2013	13:19:33	0	3,72E+04	3,48E+04	3,40E+04	27.4E+0
28/11/2013	14:19:43	1	3,71E+04	3,46E+04	3,37E+04	27.4E+0
28/11/2013	15:19:53	2	3,70E+04	3,45E+04	3,36E+04	27.3E+0
28/11/2013	16:20:04	3	3,70E+04	3,45E+04	3,36E+04	27.7E+0
28/11/2013	17:20:14	4	3,69E+04	3,44E+04	3,35E+04	27.6E+0
28/11/2013	18:20:24	5	3,68E+04	3,43E+04	3,35E+04	27.6E+0
28/11/2013	19:20:35	6	3,69E+04	3,44E+04	3,35E+04	27.8E+0
28/11/2013	20:20:45	7	3,71E+04	3,46E+04	3,36E+04	27.6E+0
28/11/2013	21:20:55	8	3,73E+04	3,48E+04	3,36E+04	27.3E+0
28/11/2013	22:21:05	9	3,74E+04	3,48E+04	3,37E+04	27.4E+0
28/11/2013	23:21:16	10	3,74E+04	3,49E+04	3,37E+04	27.5E+0
29/11/2013	0:21:26	11	3,74E+04	3,50E+04	3,37E+04	27.3E+0
29/11/2013	1:21:36	12	3,73E+04	3,48E+04	3,37E+04	27.2E+0
29/11/2013	2:21:47	13	3,75E+04	3,50E+04	3,38E+04	27.2E+0
29/11/2013	3:21:57	14	3,74E+04	3,51E+04	3,38E+04	26.9E+0
29/11/2013	4:22:07	15	3,75E+04	3,51E+04	3,38E+04	26.9E+0
29/11/2013	5:22:17	16	3,74E+04	3,50E+04	3,38E+04	26.9E+0
29/11/2013	6:22:28	17	3,73E+04	3,49E+04	3,38E+04	26.8E+0
29/11/2013	7:22:38	18	3,73E+04	3,49E+04	3,39E+04	26.8E+0
29/11/2013	8:22:48	19	3,73E+04	3,49E+04	3,39E+04	26.6E+0
29/11/2013	9:22:59	20	3,70E+04	3,46E+04	3,37E+04	26.5E+0
29/11/2013	10:23:09	21	3,72E+04	3,47E+04	3,38E+04	26.4E+0
29/11/2013	11:23:19	22	3,72E+04	3,47E+04	3,37E+04	26.7E+0
29/11/2013	12:23:29	23	3,72E+04	3,46E+04	3,37E+04	26.4E+0
29/11/2013	13:23:40	24	3,72E+04	3,46E+04	3,36E+04	26.6E+0
29/11/2013	14:23:50	25	3,73E+04	3,47E+04	3,36E+04	26.6E+0
29/11/2013	15:24:00	26	3,73E+04	3,47E+04	3,36E+04	26.7E+0
29/11/2013	16:24:11	27	3,72E+04	3,46E+04	3,36E+04	26.7E+0
29/11/2013	17:24:21	28	3,70E+04	3,44E+04	3,35E+04	26.4E+0
29/11/2013	18:24:31	29	3,69E+04	3,44E+04	3,35E+04	26.4E+0
29/11/2013	19:24:42	30	3,72E+04	3,46E+04	3,36E+04	26.4E+0
29/11/2013	20:24:52	31	3,73E+04	3,48E+04	3,36E+04	26.4E+0
29/11/2013	21:25:02	32	3,75E+04	3,49E+04	3,36E+04	26.3E+0
29/11/2013	22:25:13	33	3,74E+04	3,50E+04	3,38E+04	26.1E+0
29/11/2013	23:25:23	34	3,74E+04	3,49E+04	3,37E+04	25.9E+0

30/11/2013	0:25:33	35	3,75E+04	3,50E+04	3,38E+04	25.9E+0
30/11/2013	1:25:44	36	3,75E+04	3,51E+04	3,38E+04	25.8E+0
30/11/2013	2:25:54	37	3,75E+04	3,50E+04	3,37E+04	25.9E+0
30/11/2013	3:27:06	38	3,73E+04	3,49E+04	3,38E+04	25.8E+0
30/11/2013	4:27:16	39	3,75E+04	3,49E+04	3,38E+04	25.6E+0
30/11/2013	5:27:27	40	3,75E+04	3,52E+04	3,40E+04	25.7E+0
30/11/2013	6:27:37	41	3,77E+04	3,53E+04	3,41E+04	25.5E+0
30/11/2013	7:27:47	42	3,76E+04	3,52E+04	3,40E+04	25.6E+0
30/11/2013	8:27:58	43	3,77E+04	3,53E+04	3,40E+04	25.5E+0
30/11/2013	9:28:08	44	3,76E+04	3,53E+04	3,40E+04	25.6E+0
30/11/2013	10:28:18	45	3,76E+04	3,51E+04	3,40E+04	25.5E+0
30/11/2013	11:28:28	46	3,77E+04	3,52E+04	3,39E+04	25.5E+0
30/11/2013	12:28:39	47	3,77E+04	3,53E+04	3,40E+04	25.7E+0
30/11/2013	13:28:49	48	3,77E+04	3,53E+04	3,40E+04	25.9E+0
30/11/2013	14:28:59	49	3,76E+04	3,51E+04	3,39E+04	25.9E+0
30/11/2013	15:29:09	50	3,76E+04	3,51E+04	3,38E+04	25.7E+0
30/11/2013	16:29:20	51	3,77E+04	3,53E+04	3,39E+04	25.7E+0
30/11/2013	17:29:30	52	3,75E+04	3,51E+04	3,39E+04	25.7E+0
30/11/2013	18:29:40	53	3,77E+04	3,52E+04	3,40E+04	25.7E+0
30/11/2013	19:29:51	54	3,76E+04	3,49E+04	3,38E+04	25.7E+0
30/11/2013	20:30:01	55	3,76E+04	3,49E+04	3,38E+04	25.8E+0
30/11/2013	21:30:11	56	3,76E+04	3,49E+04	3,38E+04	25.7E+0
30/11/2013	22:30:22	57	3,76E+04	3,50E+04	3,39E+04	25.5E+0
30/11/2013	23:30:32	58	3,76E+04	3,50E+04	3,38E+04	25.3E+0
01/12/2013	0:30:42	59	3,78E+04	3,51E+04	3,39E+04	25.2E+0
01/12/2013	1:30:53	60	3,77E+04	3,50E+04	3,39E+04	25.0E+0
01/12/2013	2:31:03	61	3,77E+04	3,50E+04	3,39E+04	25.0E+0
01/12/2013	3:31:13	62	3,76E+04	3,50E+04	3,38E+04	24.8E+0
01/12/2013	4:31:23	63	3,76E+04	3,49E+04	3,38E+04	24.9E+0
01/12/2013	5:31:34	64	3,77E+04	3,50E+04	3,39E+04	25.0E+0
01/12/2013	6:31:44	65	3,76E+04	3,50E+04	3,38E+04	25.5E+0
01/12/2013	7:31:54	66	3,76E+04	3,49E+04	3,38E+04	26.1E+0
01/12/2013	8:32:05	67	3,77E+04	3,50E+04	3,39E+04	26.6E+0
01/12/2013	9:32:15	68	3,78E+04	3,55E+04	3,42E+04	27.1E+0
01/12/2013	10:32:25	69	3,77E+04	3,51E+04	3,39E+04	27.0E+0
01/12/2013	11:32:35	70	3,78E+04	3,52E+04	3,40E+04	27.0E+0
01/12/2013	12:32:46	71	3,78E+04	3,51E+04	3,39E+04	26.9E+0
01/12/2013	13:32:56	72	3,78E+04	3,51E+04	3,39E+04	27.5E+0
01/12/2013	14:33:06	73	3,77E+04	3,51E+04	3,39E+04	27.8E+0
01/12/2013	15:33:17	74	3,78E+04	3,51E+04	3,39E+04	27.9E+0
01/12/2013	16:33:27	75	3,77E+04	3,50E+04	3,39E+04	27.9E+0
01/12/2013	17:33:37	76	3,76E+04	3,49E+04	3,39E+04	27.7E+0
01/12/2013	18:33:48	77	3,76E+04	3,49E+04	3,39E+04	27.4E+0
01/12/2013	19:33:58	78	3,77E+04	3,50E+04	3,38E+04	27.7E+0
01/12/2013	20:34:08	79	3,76E+04	3,49E+04	3,39E+04	27.6E+0
01/12/2013	21:34:19	80	3,78E+04	3,50E+04	3,39E+04	27.4E+0

01/12/2013	22:34:29	81	3,77E+04	3,51E+04	3,39E+04	27.5E+0
01/12/2013	23:34:39	82	3,77E+04	3,50E+04	3,39E+04	27.3E+0
02/12/2013	0:34:49	83	3,78E+04	3,52E+04	3,39E+04	27.2E+0
02/12/2013	1:35:00	84	3,78E+04	3,51E+04	3,40E+04	27.2E+0
02/12/2013	2:35:10	85	3,78E+04	3,50E+04	3,39E+04	27.1E+0
02/12/2013	3:35:20	86	3,78E+04	3,51E+04	3,40E+04	27.1E+0
02/12/2013	4:35:31	87	3,78E+04	3,52E+04	3,40E+04	26.8E+0
02/12/2013	5:35:41	88	3,77E+04	3,52E+04	3,40E+04	27.1E+0
02/12/2013	6:35:51	89	3,77E+04	3,51E+04	3,40E+04	27.9E+0
02/12/2013	7:36:02	90	3,77E+04	3,51E+04	3,41E+04	28.4E+0
02/12/2013	8:36:12	91	3,77E+04	3,50E+04	3,41E+04	29.0E+0
02/12/2013	9:36:22	92	3,75E+04	3,49E+04	3,40E+04	29.3E+0
02/12/2013	10:36:32	93	3,73E+04	3,47E+04	3,39E+04	29.2E+0
02/12/2013	11:36:43	94	3,74E+04	3,46E+04	3,38E+04	29.0E+0
02/12/2013	12:36:53	95	3,73E+04	3,46E+04	3,37E+04	28.9E+0
02/12/2013	13:37:03	96	3,71E+04	3,45E+04	3,36E+04	29.4E+0
02/12/2013	14:37:14	97	3,73E+04	3,47E+04	3,37E+04	29.8E+0
02/12/2013	15:37:24	98	3,73E+04	3,47E+04	3,36E+04	29.8E+0
02/12/2013	16:37:34	99	3,72E+04	3,46E+04	3,36E+04	29.2E+0
02/12/2013	17:37:45	100	3,71E+04	3,45E+04	3,35E+04	29.2E+0
02/12/2013	18:37:55	101	3,72E+04	3,46E+04	3,38E+04	29.1E+0
02/12/2013	19:38:05	102	3,72E+04	3,47E+04	3,38E+04	28.6E+0
02/12/2013	20:38:16	103	3,74E+04	3,48E+04	3,37E+04	28.6E+0
02/12/2013	21:38:26	104	3,75E+04	3,48E+04	3,37E+04	28.4E+0
02/12/2013	22:38:36	105	3,75E+04	3,48E+04	3,37E+04	28.4E+0
02/12/2013	23:38:47	106	3,76E+04	3,49E+04	3,37E+04	28.2E+0
03/12/2013	0:38:57	107	3,75E+04	3,49E+04	3,38E+04	28.0E+0
03/12/2013	1:39:07	108	3,75E+04	3,49E+04	3,38E+04	28.0E+0
03/12/2013	2:39:17	109	3,77E+04	3,50E+04	3,38E+04	27.8E+0
03/12/2013	3:39:28	110	3,75E+04	3,48E+04	3,38E+04	27.8E+0
03/12/2013	4:39:38	111	3,75E+04	3,48E+04	3,38E+04	27.6E+0
03/12/2013	5:39:48	112	3,74E+04	3,48E+04	3,37E+04	27.8E+0
03/12/2013	6:39:59	113	3,75E+04	3,49E+04	3,38E+04	28.6E+0
03/12/2013	7:40:09	114	3,75E+04	3,49E+04	3,39E+04	29.0E+0
03/12/2013	8:40:19	115	3,75E+04	3,49E+04	3,39E+04	28.6E+0
03/12/2013	9:40:29	116	3,73E+04	3,46E+04	3,38E+04	28.8E+0
03/12/2013	10:40:40	117	3,72E+04	3,46E+04	3,38E+04	28.6E+0
03/12/2013	11:40:50	118	3,76E+04	3,48E+04	3,41E+04	27.8E+0
03/12/2013	12:41:00	119	3,73E+04	3,46E+04	3,38E+04	28.0E+0
03/12/2013	13:41:11	120	3,72E+04	3,46E+04	3,37E+04	28.0E+0
03/12/2013	14:41:21	121	3,74E+04	3,47E+04	3,37E+04	28.1E+0
03/12/2013	15:41:31	122	3,40E+04	3,46E+04	2,91E+04	28.2E+0
03/12/2013	16:41:41	123	3,39E+04	3,11E+04	2,89E+04	28.0E+0
03/12/2013	17:41:52	124	3,34E+04	3,08E+04	2,85E+04	28.2E+0
03/12/2013	18:42:02	125	3,36E+04	3,10E+04	2,87E+04	28.1E+0
03/12/2013	19:42:12	126	3,39E+04	3,12E+04	2,90E+04	27.8E+0

03/12/2013	20:42:23	127	3,39E+04	3,11E+04	2,89E+04	27.7E+0
03/12/2013	21:42:33	128	3,42E+04	3,14E+04	2,92E+04	27.6E+0
03/12/2013	22:42:43	129	3,40E+04	3,12E+04	2,90E+04	27.5E+0
03/12/2013	23:42:53	130	3,43E+04	3,14E+04	2,93E+04	27.4E+0
04/12/2013	0:43:04	131	3,40E+04	3,13E+04	2,90E+04	27.5E+0
04/12/2013	1:43:14	132	3,44E+04	3,16E+04	2,94E+04	27.2E+0
04/12/2013	2:43:24	133	3,44E+04	3,15E+04	2,94E+04	27.1E+0
04/12/2013	3:43:35	134	3,46E+04	3,18E+04	2,95E+04	26.8E+0
04/12/2013	4:43:45	135	3,45E+04	3,19E+04	2,96E+04	26.7E+0
04/12/2013	5:43:55	136	3,42E+04	3,15E+04	2,92E+04	27.0E+0
04/12/2013	6:44:05	137	3,39E+04	3,13E+04	2,90E+04	27.2E+0
04/12/2013	7:44:16	138	3,37E+04	3,12E+04	2,88E+04	27.8E+0
04/12/2013	8:44:26	139	3,36E+04	3,11E+04	2,87E+04	27.9E+0
04/12/2013	9:44:36	140	3,37E+04	3,10E+04	2,88E+04	28.3E+0
04/12/2013	10:44:46	141	3,36E+04	3,10E+04	2,87E+04	28.4E+0
04/12/2013	11:44:57	142	3,40E+04	3,13E+04	2,90E+04	27.7E+0
04/12/2013	12:45:07	143	3,35E+04	3,09E+04	2,86E+04	27.7E+0
04/12/2013	13:45:17	144	3,40E+04	3,13E+04	2,90E+04	27.9E+0
04/12/2013	14:45:28	145	3,38E+04	3,12E+04	2,88E+04	28.0E+0
04/12/2013	15:45:38	146	3,40E+04	3,12E+04	2,90E+04	28.2E+0
04/12/2013	16:45:48	147	3,36E+04	3,09E+04	2,87E+04	27.8E+0
04/12/2013	17:45:58	148	3,34E+04	3,08E+04	2,85E+04	27.9E+0
04/12/2013	18:46:09	149	3,36E+04	3,10E+04	2,87E+04	27.9E+0
04/12/2013	19:46:19	150	3,38E+04	3,12E+04	2,89E+04	27.9E+0
04/12/2013	20:47:30	151	3,40E+04	3,12E+04	2,90E+04	27.4E+0
04/12/2013	21:47:41	152	3,41E+04	3,14E+04	2,92E+04	27.5E+0
04/12/2013	22:47:51	153	3,44E+04	3,16E+04	2,94E+04	27.6E+0
04/12/2013	23:48:01	154	3,41E+04	3,13E+04	2,91E+04	27.5E+0
05/12/2013	0:48:12	155	3,46E+04	3,17E+04	2,96E+04	27.1E+0
05/12/2013	1:48:22	156	3,45E+04	3,16E+04	2,95E+04	27.3E+0
05/12/2013	2:48:32	157	3,42E+04	3,14E+04	2,92E+04	27.0E+0
05/12/2013	3:48:42	158	3,44E+04	3,16E+04	2,93E+04	26.9E+0
05/12/2013	4:48:53	159	3,42E+04	3,14E+04	2,91E+04	26.7E+0
05/12/2013	5:49:03	160	3,38E+04	3,11E+04	2,88E+04	26.6E+0
05/12/2013	6:49:13	161	3,41E+04	3,13E+04	2,90E+04	27.1E+0
05/12/2013	7:49:24	162	3,38E+04	3,11E+04	2,88E+04	27.1E+0
05/12/2013	8:49:34	163	3,41E+04	3,14E+04	2,91E+04	27.6E+0
05/12/2013	9:49:44	164	3,39E+04	3,12E+04	2,89E+04	27.8E+0
05/12/2013	10:49:54	165	3,39E+04	3,12E+04	2,89E+04	27.7E+0
05/12/2013	11:50:05	166	3,43E+04	3,15E+04	2,93E+04	27.9E+0
05/12/2013	12:50:15	167	3,39E+04	3,12E+04	2,89E+04	27.4E+0
05/12/2013	13:50:25	168	3,39E+04	3,12E+04	2,90E+04	27.4E+0
05/12/2013	14:50:36	169	3,39E+04	3,12E+04	2,89E+04	27.4E+0
05/12/2013	15:50:46	170	3,39E+04	3,12E+04	2,90E+04	27.3E+0
05/12/2013	16:50:56	171	3,37E+04	3,10E+04	2,88E+04	27.7E+0
05/12/2013	17:51:06	172	3,39E+04	3,12E+04	2,89E+04	27.6E+0

05/12/2013	18:51:17	173	3,37E+04	3,10E+04	2,88E+04	27.6E+0
05/12/2013	19:51:27	174	3,41E+04	3,13E+04	2,91E+04	27.8E+0
05/12/2013	20:51:37	175	3,43E+04	3,15E+04	2,93E+04	27.6E+0
05/12/2013	21:51:48	176	3,42E+04	3,14E+04	2,91E+04	27.3E+0
05/12/2013	22:51:58	177	3,44E+04	3,16E+04	2,93E+04	27.4E+0
05/12/2013	23:52:08	178	3,46E+04	3,17E+04	2,95E+04	27.5E+0
06/12/2013	0:52:19	179	3,40E+04	3,12E+04	2,90E+04	27.3E+0
06/12/2013	1:52:29	180	3,44E+04	3,16E+04	2,94E+04	27.2E+0
06/12/2013	2:52:39	181	3,42E+04	3,13E+04	2,91E+04	27.2E+0
06/12/2013	3:52:49	182	3,42E+04	3,14E+04	2,92E+04	26.9E+0
06/12/2013	4:53:00	183	3,43E+04	3,15E+04	2,92E+04	26.9E+0
06/12/2013	5:53:10	184	3,43E+04	3,15E+04	2,92E+04	26.9E+0
06/12/2013	6:53:20	185	3,41E+04	3,13E+04	2,90E+04	26.8E+0
06/12/2013	7:53:31	186	3,39E+04	3,12E+04	2,89E+04	26.8E+0
06/12/2013	8:53:41	187	3,43E+04	3,15E+04	2,92E+04	26.6E+0
06/12/2013	9:53:51	188	3,43E+04	3,14E+04	2,92E+04	26.5E+0
06/12/2013	10:54:01	189	3,45E+04	3,16E+04	2,94E+04	26.4E+0
06/12/2013	11:54:12	190	3,46E+04	3,17E+04	2,95E+04	26.7E+0
06/12/2013	12:54:22	191	3,47E+04	3,17E+04	2,96E+04	26.4E+0
06/12/2013	13:54:32	192	3,47E+04	3,17E+04	2,96E+04	26.6E+0
06/12/2013	14:54:43	193	3,45E+04	3,16E+04	2,94E+04	26.6E+0
06/12/2013	15:54:53	194	3,43E+04	3,15E+04	2,92E+04	26.7E+0
06/12/2013	16:55:03	195	3,43E+04	3,14E+04	2,92E+04	26.7E+0
06/12/2013	17:55:13	196	3,39E+04	3,11E+04	2,89E+04	26.4E+0
06/12/2013	18:55:24	197	3,42E+04	3,13E+04	2,91E+04	26.4E+0
06/12/2013	19:55:34	198	3,42E+04	3,14E+04	2,91E+04	26.4E+0
06/12/2013	20:55:44	199	3,39E+04	3,12E+04	2,89E+04	26.4E+0
06/12/2013	21:55:55	200	3,45E+04	3,16E+04	2,94E+04	26.3E+0
06/12/2013	22:56:05	201	3,42E+04	3,14E+04	2,92E+04	26.1E+0
06/12/2013	23:56:15	202	3,46E+04	3,16E+04	2,95E+04	25.9E+0
07/12/2013	0:56:25	203	3,47E+04	3,17E+04	2,96E+04	25.9E+0
07/12/2013	1:56:36	204	3,44E+04	3,16E+04	2,92E+04	25.8E+0
07/12/2013	2:56:46	205	3,45E+04	3,16E+04	2,94E+04	25.9E+0
07/12/2013	3:56:57	206	3,43E+04	3,15E+04	2,92E+04	25.8E+0
07/12/2013	4:57:07	207	3,43E+04	3,15E+04	2,92E+04	25.6E+0
07/12/2013	5:57:17	208	3,41E+04	3,14E+04	2,90E+04	25.7E+0
07/12/2013	6:57:28	209	3,41E+04	3,15E+04	2,91E+04	25.5E+0
07/12/2013	7:57:38	210	3,43E+04	3,16E+04	2,92E+04	25.6E+0
07/12/2013	8:57:48	211	3,41E+04	3,14E+04	2,91E+04	25.5E+0
07/12/2013	9:57:58	212	3,38E+04	3,11E+04	2,87E+04	25.6E+0
07/12/2013	10:58:09	213	3,44E+04	3,15E+04	2,93E+04	25.5E+0
07/12/2013	11:58:19	214	3,45E+04	3,17E+04	2,94E+04	25.5E+0
07/12/2013	12:58:29	215	3,46E+04	3,17E+04	2,94E+04	25.7E+0
07/12/2013	13:58:40	216	3,46E+04	3,17E+04	2,94E+04	25.9E+0
07/12/2013	14:58:50	217	3,45E+04	3,16E+04	2,93E+04	25.9E+0
07/12/2013	15:59:00	218	3,46E+04	3,18E+04	2,95E+04	25.7E+0

07/12/2013	16:59:10	219	3,42E+04	3,14E+04	2,92E+04	25.7E+0
07/12/2013	17:59:21	220	3,39E+04	3,12E+04	2,88E+04	25.7E+0
07/12/2013	18:59:31	221	3,42E+04	3,14E+04	2,91E+04	25.7E+0
07/12/2013	19:59:41	222	3,42E+04	3,14E+04	2,91E+04	25.7E+0
07/12/2013	20:59:52	223	3,41E+04	3,13E+04	2,91E+04	25.8E+0
07/12/2013	22:00:02	224	3,43E+04	3,15E+04	2,92E+04	25.7E+0
07/12/2013	23:00:12	225	3,45E+04	3,16E+04	2,94E+04	25.5E+0
08/12/2013	0:00:22	226	3,43E+04	3,15E+04	2,92E+04	25.3E+0
08/12/2013	1:00:33	227	3,45E+04	3,17E+04	2,94E+04	25.2E+0
08/12/2013	2:01:49	228	3,47E+04	3,17E+04	2,96E+04	25.0E+0
08/12/2013	3:02:00	229	3,42E+04	3,14E+04	2,91E+04	25.0E+0
08/12/2013	4:02:10	230	3,46E+04	3,18E+04	2,95E+04	24.8E+0
08/12/2013	5:02:20	231	3,46E+04	3,17E+04	2,94E+04	24.9E+0
08/12/2013	6:02:30	232	3,45E+04	3,18E+04	2,94E+04	25.0E+0
08/12/2013	7:02:41	233	3,43E+04	3,16E+04	2,92E+04	25.5E+0
08/12/2013	8:02:51	234	3,41E+04	3,15E+04	2,91E+04	26.1E+0
08/12/2013	9:03:01	235	3,40E+04	3,14E+04	2,90E+04	26.6E+0
08/12/2013	10:03:12	236	3,44E+04	3,16E+04	2,93E+04	27.1E+0
08/12/2013	11:03:22	237	3,42E+04	3,14E+04	2,91E+04	27.0E+0
08/12/2013	12:03:32	238	3,48E+04	3,19E+04	2,97E+04	27.0E+0
08/12/2013	13:03:42	239	3,45E+04	3,16E+04	2,93E+04	26.9E+0
08/12/2013	14:03:53	240	3,43E+04	3,15E+04	2,91E+04	27.5E+0
08/12/2013	15:04:03	241	3,44E+04	3,16E+04	2,93E+04	27.8E+0
08/12/2013	16:04:13	242	3,47E+04	3,18E+04	2,95E+04	27.9E+0
08/12/2013	17:04:23	243	3,46E+04	3,17E+04	2,94E+04	27.9E+0
08/12/2013	18:04:34	244	3,40E+04	3,13E+04	2,89E+04	27.7E+0
08/12/2013	19:04:44	245	3,44E+04	3,15E+04	2,92E+04	27.4E+0
08/12/2013	20:04:54	246	3,44E+04	3,15E+04	2,92E+04	27.7E+0
08/12/2013	21:05:05	247	3,44E+04	3,16E+04	2,93E+04	27.6E+0
08/12/2013	22:05:15	248	3,45E+04	3,17E+04	2,94E+04	27.4E+0
08/12/2013	23:05:25	249	3,46E+04	3,17E+04	2,95E+04	27.5E+0
09/12/2013	0:05:35	250	3,46E+04	3,17E+04	2,94E+04	27.3E+0
09/12/2013	1:05:46	251	3,46E+04	3,17E+04	2,94E+04	27.2E+0
09/12/2013	2:05:56	252	3,47E+04	3,19E+04	2,95E+04	27.2E+0
09/12/2013	3:06:06	253	3,48E+04	3,20E+04	2,96E+04	27.1E+0
09/12/2013	4:06:17	254	3,47E+04	3,18E+04	2,96E+04	27.1E+0
09/12/2013	5:06:27	255	3,46E+04	3,17E+04	2,95E+04	26.8E+0
09/12/2013	6:06:37	256	3,42E+04	3,15E+04	2,90E+04	27.1E+0
09/12/2013	7:06:48	257	3,34E+04	3,10E+04	2,83E+04	27.9E+0
09/12/2013	8:06:58	258	3,34E+04	3,10E+04	2,84E+04	28.4E+0
09/12/2013	9:07:08	259	3,37E+04	3,11E+04	2,87E+04	29.0E+0
09/12/2013	10:07:19	260	3,32E+04	3,09E+04	2,82E+04	29.3E+0
09/12/2013	11:07:29	261	3,33E+04	3,08E+04	2,83E+04	29.2E+0
09/12/2013	12:07:40	262	3,35E+04	3,09E+04	2,86E+04	29.0E+0
09/12/2013	13:07:50	263	3,37E+04	3,10E+04	2,87E+04	28.9E+0
09/12/2013	14:08:00	264	3,38E+04	3,11E+04	2,88E+04	29.4E+0

09/12/2013	15:08:11	265	3,42E+04	3,13E+04	2,91E+04	29.8E+0
09/12/2013	16:08:21	266	3,41E+04	3,13E+04	2,91E+04	29.8E+0
09/12/2013	17:08:31	267	3,41E+04	3,12E+04	2,91E+04	29.2E+0
09/12/2013	18:08:41	268	3,32E+04	3,06E+04	2,83E+04	29.2E+0
09/12/2013	19:08:52	269	3,37E+04	3,10E+04	2,87E+04	29.1E+0
09/12/2013	20:09:02	270	3,39E+04	3,12E+04	2,89E+04	28.6E+0
09/12/2013	21:09:13	271	3,44E+04	3,16E+04	2,94E+04	28.6E+0
09/12/2013	22:09:23	272	3,43E+04	3,14E+04	2,93E+04	28.4E+0
09/12/2013	23:09:34	273	3,47E+04	3,17E+04	2,96E+04	28.4E+0
10/12/2013	0:09:44	274	3,44E+04	3,15E+04	2,93E+04	28.2E+0
10/12/2013	1:09:55	275	3,43E+04	3,15E+04	2,92E+04	28.0E+0
10/12/2013	2:10:06	276	3,42E+04	3,14E+04	2,92E+04	28.0E+0
10/12/2013	3:10:16	277	3,43E+04	3,15E+04	2,93E+04	27.8E+0
10/12/2013	4:10:26	278	3,43E+04	3,15E+04	2,92E+04	27.8E+0
10/12/2013	5:10:37	279	3,42E+04	3,13E+04	2,91E+04	27.6E+0
10/12/2013	6:10:47	280	3,38E+04	3,11E+04	2,88E+04	27.8E+0
10/12/2013	7:10:58	281	3,36E+04	3,09E+04	2,86E+04	28.6E+0
10/12/2013	8:11:08	282	3,32E+04	3,06E+04	2,82E+04	29.0E+0
10/12/2013	9:11:19	283	3,34E+04	3,08E+04	2,84E+04	28.6E+0
10/12/2013	10:11:29	284	3,34E+04	3,08E+04	2,85E+04	28.8E+0
10/12/2013	11:11:39	285	3,36E+04	3,10E+04	2,86E+04	28.6E+0
10/12/2013	12:11:49	286	3,38E+04	3,11E+04	2,88E+04	27.8E+0
10/12/2013	13:12:00	287	3,35E+04	3,08E+04	2,86E+04	28.0E+0
10/12/2013	14:28:37	288	3,37E+04	3,09E+04	2,87E+04	28.0E+0
10/12/2013	15:28:47	289	3,36E+04	3,09E+04	2,86E+04	28.1E+0
10/12/2013	16:28:58	290	3,36E+04	3,08E+04	2,86E+04	28.2E+0
10/12/2013	17:29:08	291	3,35E+04	3,08E+04	2,85E+04	28.0E+0
10/12/2013	18:29:18	292	3,38E+04	3,11E+04	2,88E+04	28.2E+0
10/12/2013	19:29:29	293	3,41E+04	3,13E+04	2,91E+04	28.1E+0
10/12/2013	20:29:39	294	3,42E+04	3,13E+04	2,91E+04	27.8E+0
10/12/2013	21:29:49	295	3,42E+04	3,13E+04	2,92E+04	27.7E+0
10/12/2013	22:30:00	296	3,45E+04	3,16E+04	2,94E+04	27.6E+0
10/12/2013	23:30:10	297	3,42E+04	3,13E+04	2,91E+04	27.5E+0
11/12/2013	0:30:20	298	3,38E+04	3,11E+04	2,88E+04	27.4E+0
11/12/2013	1:30:31	299	3,41E+04	3,12E+04	2,90E+04	27.5E+0
11/12/2013	2:30:41	300	3,41E+04	3,13E+04	2,91E+04	27.2E+0
11/12/2013	3:30:51	301	3,44E+04	3,15E+04	2,93E+04	27.1E+0
11/12/2013	4:31:02	302	3,42E+04	3,15E+04	2,92E+04	26.8E+0
11/12/2013	5:31:12	303	3,40E+04	3,12E+04	2,90E+04	26.7E+0
11/12/2013	6:31:22	304	3,43E+04	3,15E+04	2,93E+04	27.0E+0
11/12/2013	7:31:33	305	3,34E+04	3,08E+04	2,84E+04	27.2E+0
11/12/2013	8:31:43	306	3,37E+04	3,10E+04	2,87E+04	27.8E+0
11/12/2013	9:31:53	307	3,34E+04	3,07E+04	2,84E+04	27.9E+0
11/12/2013	10:32:04	308	3,34E+04	3,08E+04	2,85E+04	28.3E+0
11/12/2013	11:32:14	309	3,38E+04	3,11E+04	2,88E+04	27.9E+0
11/12/2013	12:32:24	310	3,39E+04	3,11E+04	2,89E+04	28.2E+0

11/12/2013	13:32:35	311	3,38E+04	3,11E+04	2,88E+04	28.7E+0
11/12/2013	14:32:45	312	3,41E+04	3,13E+04	2,90E+04	29.5E+0
11/12/2013	15:32:55	313	3,39E+04	3,11E+04	2,89E+04	29.8E+0
11/12/2013	16:33:06	314	3,38E+04	3,11E+04	2,88E+04	30.1E+0
11/12/2013	17:33:16	315	3,34E+04	3,08E+04	2,85E+04	30.6E+0
11/12/2013	18:33:26	316	3,35E+04	3,08E+04	2,85E+04	30.5E+0
11/12/2013	19:33:37	317	3,36E+04	3,09E+04	2,86E+04	30.3E+0
11/12/2013	20:33:47	318	3,39E+04	3,12E+04	2,89E+04	30.0E+0
11/12/2013	21:33:57	319	3,40E+04	3,12E+04	2,90E+04	29.7E+0
11/12/2013	22:34:08	320	3,42E+04	3,13E+04	2,91E+04	29.0E+0
11/12/2013	23:34:18	321	3,44E+04	3,15E+04	2,93E+04	29.4E+0
12/12/2013	0:34:28	322	3,45E+04	3,16E+04	2,94E+04	29.3E+0
12/12/2013	1:34:38	323	3,42E+04	3,14E+04	2,92E+04	29.1E+0
12/12/2013	2:34:49	324	3,39E+04	3,11E+04	2,89E+04	28.8E+0
12/12/2013	3:34:59	325	3,41E+04	3,13E+04	2,91E+04	28.8E+0
12/12/2013	4:35:09	326	3,42E+04	3,14E+04	2,91E+04	28.0E+0
12/12/2013	5:35:20	327	3,39E+04	3,12E+04	2,89E+04	27.8E+0
12/12/2013	6:35:30	328	3,35E+04	3,10E+04	2,85E+04	27.5E+0
12/12/2013	7:35:40	329	3,33E+04	3,08E+04	2,83E+04	27.9E+0
12/12/2013	8:35:50	330	3,39E+04	3,12E+04	2,89E+04	28.3E+0
12/12/2013	9:36:01	331	3,39E+04	3,11E+04	2,89E+04	28.9E+0
12/12/2013	10:36:11	332	3,35E+04	3,08E+04	2,85E+04	29.8E+0
12/12/2013	12:39:21	333	3,36E+04	3,09E+04	2,86E+04	28.4E+0
12/12/2013	13:39:31	334	3,38E+04	3,10E+04	2,87E+04	27.7E+0
12/12/2013	14:39:42	335	3,40E+04	3,12E+04	2,90E+04	27.7E+0
12/12/2013	15:39:52	336	3,37E+04	3,10E+04	2,86E+04	27.9E+0
12/12/2013	16:40:02	337	3,34E+04	3,07E+04	2,84E+04	28.0E+0
12/12/2013	17:40:13	338	3,33E+04	3,07E+04	2,84E+04	28.2E+0
12/12/2013	18:40:23	339	3,36E+04	3,09E+04	2,86E+04	27.8E+0
12/12/2013	19:40:33	340	3,40E+04	3,12E+04	2,89E+04	27.9E+0
12/12/2013	20:40:43	341	3,42E+04	3,13E+04	2,91E+04	27.9E+0
12/12/2013	21:40:54	342	3,41E+04	3,13E+04	2,91E+04	27.9E+0
12/12/2013	22:41:04	343	3,45E+04	3,16E+04	2,94E+04	27.4E+0
12/12/2013	23:41:14	344	3,45E+04	3,15E+04	2,94E+04	27.5E+0
13/12/2013	0:41:24	345	3,45E+04	3,15E+04	2,94E+04	27.6E+0
13/12/2013	1:41:35	346	3,43E+04	3,14E+04	2,93E+04	27.5E+0
13/12/2013	2:41:45	347	3,43E+04	3,14E+04	2,92E+04	27.1E+0
13/12/2013	3:41:55	348	3,44E+04	3,15E+04	2,93E+04	27.3E+0
13/12/2013	4:42:06	349	3,43E+04	3,14E+04	2,92E+04	27.0E+0
13/12/2013	5:42:16	350	3,40E+04	3,12E+04	2,90E+04	26.9E+0
13/12/2013	6:42:26	351	3,39E+04	3,11E+04	2,88E+04	26.7E+0
13/12/2013	7:42:36	352	3,32E+04	3,06E+04	2,82E+04	26.6E+0
13/12/2013	8:42:47	353	3,38E+04	3,10E+04	2,87E+04	27.1E+0
13/12/2013	9:42:57	354	3,34E+04	3,08E+04	2,84E+04	27.1E+0
13/12/2013	10:43:07	355	3,35E+04	3,08E+04	2,85E+04	27.6E+0
13/12/2013	11:43:18	356	3,35E+04	3,08E+04	2,84E+04	27.8E+0

13/12/2013	12:43:28	357	3,35E+04	3,08E+04	2,84E+04	27.7E+0
13/12/2013	13:43:38	358	3,35E+04	3,08E+04	2,85E+04	27.9E+0
13/12/2013	14:43:48	359	3,38E+04	3,10E+04	2,87E+04	27.4E+0
13/12/2013	15:43:59	360	3,37E+04	3,09E+04	2,85E+04	27.4E+0
13/12/2013	16:44:09	361	3,35E+04	3,09E+04	2,84E+04	27.4E+0
13/12/2013	17:44:19	362	3,32E+04	3,07E+04	2,81E+04	27.3E+0
13/12/2013	18:44:29	363	3,33E+04	3,07E+04	2,82E+04	27.7E+0
13/12/2013	19:44:40	364	3,35E+04	3,08E+04	2,83E+04	27.6E+0
13/12/2013	20:44:50	365	3,37E+04	3,10E+04	2,86E+04	27.6E+0
13/12/2013	21:45:00	366	3,42E+04	3,13E+04	2,90E+04	27.8E+0
13/12/2013	22:45:11	367	3,43E+04	3,14E+04	2,91E+04	27.6E+0
13/12/2013	23:45:21	368	3,41E+04	3,13E+04	2,88E+04	27.3E+0
14/12/2013	0:45:31	369	3,41E+04	3,13E+04	2,89E+04	27.4E+0
14/12/2013	1:45:41	370	3,41E+04	3,13E+04	2,89E+04	27.5E+0
14/12/2013	2:45:52	371	3,42E+04	3,14E+04	2,89E+04	27.3E+0
14/12/2013	3:46:02	372	3,43E+04	3,15E+04	2,91E+04	27.2E+0
14/12/2013	4:46:12	373	3,41E+04	3,12E+04	2,88E+04	27.2E+0
14/12/2013	5:46:22	374	3,40E+04	3,13E+04	2,88E+04	26.9E+0
14/12/2013	6:46:33	375	3,38E+04	3,10E+04	2,85E+04	26.9E+0
14/12/2013	7:46:43	376	3,38E+04	3,11E+04	2,85E+04	26.9E+0
14/12/2013	8:46:53	377	3,40E+04	3,12E+04	2,87E+04	26.8E+0
14/12/2013	9:47:04	378	3,41E+04	3,13E+04	2,88E+04	26.8E+0
14/12/2013	10:47:14	379	3,39E+04	3,12E+04	2,86E+04	26.6E+0
14/12/2013	11:47:24	380	3,42E+04	3,14E+04	2,88E+04	26.5E+0
14/12/2013	12:47:34	381	3,45E+04	3,17E+04	2,92E+04	26.4E+0
14/12/2013	13:47:45	382	3,40E+04	3,12E+04	2,86E+04	26.7E+0
14/12/2013	14:47:55	383	3,41E+04	3,13E+04	2,87E+04	26.4E+0
14/12/2013	15:48:05	384	3,41E+04	3,13E+04	2,87E+04	26.6E+0
14/12/2013	16:48:16	385	3,43E+04	3,14E+04	2,89E+04	26.6E+0
14/12/2013	17:48:26	386	3,37E+04	3,10E+04	2,83E+04	26.7E+0
14/12/2013	18:48:36	387	3,43E+04	3,15E+04	2,89E+04	26.7E+0
14/12/2013	19:48:46	388	3,42E+04	3,14E+04	2,88E+04	26.4E+0
14/12/2013	20:48:57	389	3,41E+04	3,13E+04	2,86E+04	26.4E+0
14/12/2013	21:49:07	390	3,41E+04	3,13E+04	2,87E+04	26.4E+0
14/12/2013	22:49:17	391	3,43E+04	3,14E+04	2,88E+04	26.4E+0
14/12/2013	23:49:27	392	3,45E+04	3,16E+04	2,91E+04	26.3E+0
15/12/2013	0:49:38	393	3,44E+04	3,16E+04	2,88E+04	26.1E+0
15/12/2013	1:51:00	394	3,46E+04	3,17E+04	2,90E+04	25.9E+0
15/12/2013	2:51:10	395	3,42E+04	3,14E+04	2,85E+04	25.9E+0
15/12/2013	3:51:21	396	3,40E+04	3,13E+04	2,84E+04	25.8E+0
15/12/2013	4:51:31	397	3,41E+04	3,13E+04	2,85E+04	25.9E+0
15/12/2013	5:51:41	398	3,39E+04	3,12E+04	2,83E+04	25.8E+0
15/12/2013	6:51:52	399	3,42E+04	3,14E+04	2,85E+04	25.6E+0
15/12/2013	7:52:02	400	3,41E+04	3,13E+04	2,83E+04	25.7E+0
15/12/2013	8:52:12	401	3,40E+04	3,13E+04	2,83E+04	25.5E+0
15/12/2013	9:52:22	402	3,40E+04	3,13E+04	2,83E+04	25.6E+0

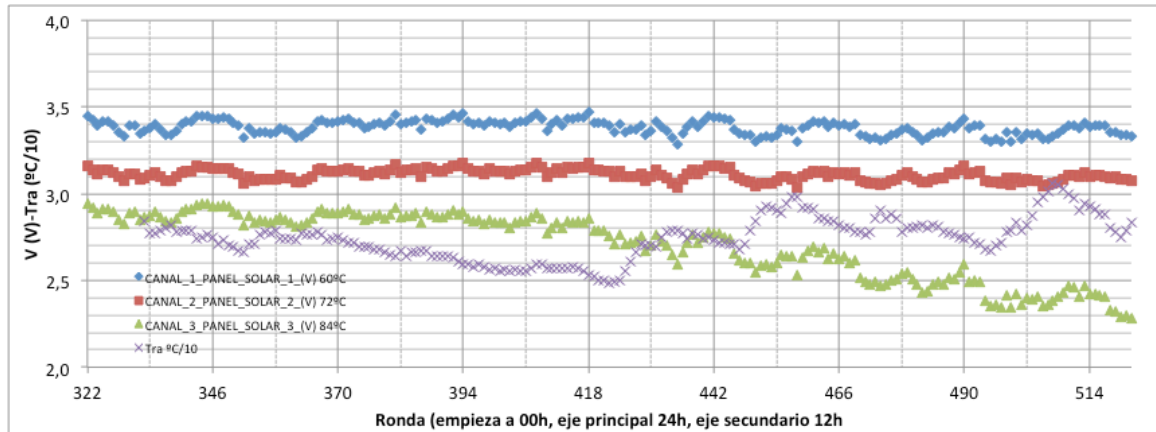
15/12/2013	10:52:33	403	3,38E+04	3,12E+04	2,80E+04	25.5E+0
15/12/2013	11:52:43	404	3,41E+04	3,13E+04	2,83E+04	25.6E+0
15/12/2013	12:52:53	405	3,42E+04	3,14E+04	2,84E+04	25.5E+0
15/12/2013	13:53:03	406	3,41E+04	3,13E+04	2,84E+04	25.5E+0
15/12/2013	14:53:14	407	3,44E+04	3,15E+04	2,87E+04	25.7E+0
15/12/2013	15:53:24	408	3,46E+04	3,17E+04	2,89E+04	25.9E+0
15/12/2013	16:53:34	409	3,43E+04	3,15E+04	2,85E+04	25.9E+0
15/12/2013	17:53:45	410	3,36E+04	3,10E+04	2,77E+04	25.7E+0
15/12/2013	18:53:55	411	3,40E+04	3,12E+04	2,80E+04	25.7E+0
15/12/2013	19:54:05	412	3,42E+04	3,14E+04	2,83E+04	25.7E+0
15/12/2013	20:54:15	413	3,39E+04	3,12E+04	2,80E+04	25.7E+0
15/12/2013	21:54:26	414	3,43E+04	3,15E+04	2,84E+04	25.7E+0
15/12/2013	22:54:36	415	3,43E+04	3,15E+04	2,83E+04	25.8E+0
15/12/2013	23:54:46	416	3,44E+04	3,15E+04	2,84E+04	25.7E+0
16/12/2013	0:54:57	417	3,44E+04	3,15E+04	2,84E+04	25.5E+0
16/12/2013	1:55:07	418	3,47E+04	3,18E+04	2,86E+04	25.3E+0
16/12/2013	2:55:17	419	3,41E+04	3,13E+04	2,78E+04	25.2E+0
16/12/2013	3:55:27	420	3,41E+04	3,14E+04	2,79E+04	25.0E+0
16/12/2013	4:55:38	421	3,41E+04	3,13E+04	2,78E+04	25.0E+0
16/12/2013	5:55:48	422	3,39E+04	3,13E+04	2,76E+04	24.8E+0
16/12/2013	6:55:58	423	3,36E+04	3,10E+04	2,71E+04	24.9E+0
16/12/2013	7:56:08	424	3,40E+04	3,13E+04	2,76E+04	25.0E+0
16/12/2013	8:56:19	425	3,36E+04	3,10E+04	2,71E+04	25.5E+0
16/12/2013	9:56:29	426	3,37E+04	3,10E+04	2,72E+04	26.1E+0
16/12/2013	10:56:39	427	3,37E+04	3,10E+04	2,72E+04	26.6E+0
16/12/2013	11:56:50	428	3,39E+04	3,11E+04	2,76E+04	27.1E+0
16/12/2013	12:57:00	429	3,34E+04	3,07E+04	2,67E+04	27.0E+0
16/12/2013	13:57:10	430	3,36E+04	3,10E+04	2,70E+04	27.0E+0
16/12/2013	14:57:20	431	3,41E+04	3,13E+04	2,76E+04	26.9E+0
16/12/2013	15:57:31	432	3,38E+04	3,10E+04	2,73E+04	27.5E+0
16/12/2013	16:57:41	433	3,36E+04	3,09E+04	2,70E+04	27.8E+0
16/12/2013	17:57:51	434	3,32E+04	3,06E+04	2,65E+04	27.9E+0
16/12/2013	18:58:02	435	3,29E+04	3,04E+04	2,60E+04	27.9E+0
16/12/2013	19:58:12	436	3,34E+04	3,08E+04	2,67E+04	27.7E+0
16/12/2013	20:58:22	437	3,38E+04	3,11E+04	2,72E+04	27.4E+0
16/12/2013	21:58:32	438	3,42E+04	3,13E+04	2,76E+04	27.7E+0
16/12/2013	22:58:43	439	3,39E+04	3,11E+04	2,72E+04	27.6E+0
16/12/2013	23:58:53	440	3,42E+04	3,13E+04	2,74E+04	27.4E+0
17/12/2013	0:59:03	441	3,45E+04	3,16E+04	2,78E+04	27.5E+0
17/12/2013	1:59:14	442	3,44E+04	3,16E+04	2,77E+04	27.3E+0
17/12/2013	2:59:24	443	3,44E+04	3,16E+04	2,77E+04	27.2E+0
17/12/2013	3:59:34	444	3,43E+04	3,15E+04	2,75E+04	27.2E+0
17/12/2013	4:59:44	445	3,43E+04	3,15E+04	2,74E+04	27.1E+0
17/12/2013	5:59:55	446	3,37E+04	3,10E+04	2,65E+04	27.1E+0
17/12/2013	7:00:05	447	3,35E+04	3,09E+04	2,62E+04	26.8E+0
17/12/2013	8:00:15	448	3,34E+04	3,08E+04	2,60E+04	27.1E+0

17/12/2013	9:00:25	449	3,34E+04	3,07E+04	2,60E+04	27.9E+0
17/12/2013	10:00:36	450	3,30E+04	3,04E+04	2,55E+04	28.4E+0
17/12/2013	11:00:46	451	3,32E+04	3,06E+04	2,58E+04	29.0E+0
17/12/2013	12:00:56	452	3,33E+04	3,06E+04	2,59E+04	29.3E+0
17/12/2013	13:01:07	453	3,32E+04	3,06E+04	2,58E+04	29.2E+0
17/12/2013	14:01:17	454	3,34E+04	3,07E+04	2,60E+04	29.0E+0
17/12/2013	15:01:27	455	3,37E+04	3,10E+04	2,65E+04	28.9E+0
17/12/2013	16:01:37	456	3,37E+04	3,09E+04	2,64E+04	29.4E+0
17/12/2013	17:01:48	457	3,36E+04	3,08E+04	2,64E+04	29.8E+0
17/12/2013	18:01:58	458	3,30E+04	3,04E+04	2,53E+04	29.8E+0
17/12/2013	19:02:08	459	3,38E+04	3,09E+04	2,63E+04	29.2E+0
17/12/2013	20:02:19	460	3,39E+04	3,11E+04	2,67E+04	29.2E+0
17/12/2013	21:02:29	461	3,41E+04	3,13E+04	2,69E+04	29.1E+0
17/12/2013	22:02:39	462	3,41E+04	3,12E+04	2,67E+04	28.6E+0
17/12/2013	23:02:49	463	3,42E+04	3,13E+04	2,68E+04	28.6E+0
18/12/2013	0:03:00	464	3,38E+04	3,10E+04	2,63E+04	28.4E+0
18/12/2013	1:03:10	465	3,41E+04	3,12E+04	2,66E+04	28.4E+0
18/12/2013	2:03:20	466	3,39E+04	3,11E+04	2,62E+04	28.2E+0
18/12/2013	3:03:30	467	3,40E+04	3,12E+04	2,64E+04	28.0E+0
18/12/2013	4:03:41	468	3,38E+04	3,10E+04	2,60E+04	28.0E+0
18/12/2013	5:03:51	469	3,40E+04	3,12E+04	2,62E+04	27.8E+0
18/12/2013	6:04:01	470	3,34E+04	3,07E+04	2,52E+04	27.8E+0
18/12/2013	7:04:12	471	3,33E+04	3,07E+04	2,50E+04	27.6E+0
18/12/2013	8:04:22	472	3,32E+04	3,06E+04	2,48E+04	27.8E+0
18/12/2013	9:04:32	473	3,33E+04	3,06E+04	2,49E+04	28.6E+0
18/12/2013	10:04:42	474	3,31E+04	3,05E+04	2,47E+04	29.0E+0
18/12/2013	11:04:53	475	3,32E+04	3,06E+04	2,47E+04	28.6E+0
18/12/2013	12:05:03	476	3,34E+04	3,07E+04	2,50E+04	28.8E+0
18/12/2013	13:05:13	477	3,34E+04	3,08E+04	2,50E+04	28.6E+0
18/12/2013	14:05:23	478	3,37E+04	3,11E+04	2,53E+04	27.8E+0
18/12/2013	15:05:34	479	3,38E+04	3,12E+04	2,55E+04	28.0E+0
18/12/2013	16:05:44	480	3,36E+04	3,10E+04	2,51E+04	28.0E+0
18/12/2013	17:05:54	481	3,34E+04	3,08E+04	2,48E+04	28.1E+0
18/12/2013	18:06:05	482	3,31E+04	3,07E+04	2,43E+04	28.2E+0
18/12/2013	19:06:15	483	3,32E+04	3,07E+04	2,44E+04	28.0E+0
18/12/2013	20:06:25	484	3,35E+04	3,08E+04	2,48E+04	28.2E+0
18/12/2013	21:06:36	485	3,36E+04	3,09E+04	2,49E+04	28.1E+0
18/12/2013	22:06:46	486	3,35E+04	3,09E+04	2,48E+04	27.8E+0
18/12/2013	23:06:56	487	3,38E+04	3,12E+04	2,52E+04	27.7E+0
19/12/2013	0:07:06	488	3,38E+04	3,11E+04	2,51E+04	27.6E+0
19/12/2013	1:07:17	489	3,41E+04	3,13E+04	2,54E+04	27.5E+0
19/12/2013	2:07:27	490	3,43E+04	3,16E+04	2,59E+04	27.4E+0
19/12/2013	3:07:37	491	3,38E+04	3,11E+04	2,49E+04	27.5E+0
19/12/2013	4:07:47	492	3,39E+04	3,12E+04	2,50E+04	27.2E+0
19/12/2013	5:07:58	493	3,39E+04	3,12E+04	2,49E+04	27.1E+0
19/12/2013	6:08:08	494	3,32E+04	3,07E+04	2,38E+04	26.8E+0

19/12/2013	7:08:18	495	3,30E+04	3,07E+04	2,35E+04	26.7E+0
19/12/2013	8:08:29	496	3,31E+04	3,06E+04	2,36E+04	27.0E+0
19/12/2013	9:08:39	497	3,30E+04	3,06E+04	2,35E+04	27.2E+0
19/12/2013	10:08:49	498	3,35E+04	3,09E+04	2,41E+04	27.8E+0
19/12/2013	11:08:59	499	3,30E+04	3,05E+04	2,34E+04	27.9E+0
19/12/2013	12:09:10	500	3,36E+04	3,09E+04	2,42E+04	28.3E+0
19/12/2013	13:09:20	501	3,32E+04	3,07E+04	2,36E+04	27.9E+0
19/12/2013	14:09:30	502	3,34E+04	3,08E+04	2,40E+04	28.2E+0
19/12/2013	15:09:41	503	3,34E+04	3,07E+04	2,39E+04	28.7E+0
19/12/2013	16:09:51	504	3,34E+04	3,07E+04	2,40E+04	29.5E+0
19/12/2013	17:10:01	505	3,31E+04	3,04E+04	2,35E+04	29.8E+0
19/12/2013	18:10:11	506	3,32E+04	3,05E+04	2,36E+04	30.1E+0
19/12/2013	19:10:22	507	3,33E+04	3,06E+04	2,38E+04	30.6E+0
19/12/2013	20:10:32	508	3,35E+04	3,07E+04	2,41E+04	30.5E+0
19/12/2013	21:10:42	509	3,37E+04	3,08E+04	2,43E+04	30.3E+0
19/12/2013	22:10:53	510	3,39E+04	3,11E+04	2,47E+04	30.0E+0
19/12/2013	23:11:03	511	3,39E+04	3,10E+04	2,46E+04	29.7E+0
20/12/2013	0:11:13	512	3,37E+04	3,10E+04	2,41E+04	29.0E+0
20/12/2013	1:11:23	513	3,41E+04	3,12E+04	2,47E+04	29.4E+0
20/12/2013	2:11:34	514	3,39E+04	3,10E+04	2,43E+04	29.3E+0
20/12/2013	3:11:44	515	3,39E+04	3,11E+04	2,42E+04	29.1E+0
20/12/2013	4:11:54	516	3,39E+04	3,11E+04	2,41E+04	28.8E+0
20/12/2013	5:12:05	517	3,39E+04	3,10E+04	2,41E+04	28.8E+0
20/12/2013	6:12:15	518	3,35E+04	3,09E+04	2,33E+04	28.0E+0
20/12/2013	7:12:25	519	3,36E+04	3,10E+04	2,32E+04	27.8E+0
20/12/2013	8:12:35	520	3,34E+04	3,08E+04	2,29E+04	27.5E+0
20/12/2013	9:12:46	521	3,34E+04	3,08E+04	2,29E+04	27.9E+0
20/12/2013	10:12:56	522	3,33E+04	3,07E+04	2,28E+04	28.3E+0
20/12/2013	11:13:06	523	3,33E+04	3,07E+04	2,28E+04	28.9E+0
20/12/2013	12:13:17	524	3,34E+04	3,10E+04	2,28E+04	29.8E+0

Podemos comprobar como las placa numero 6 y placa numero 10 prácticamente no ha variado su funcionamiento mientras la placa numero 11 ha empezado a entregarnos menos tensión. Después de que ocurriera esto invertimos las placas para comprobar si el foco estuviera perdiendo su potencia pero comprobamos que el foco esta perfecto con lo cual llegamos a la conclusión de que la placa se había degenerado.

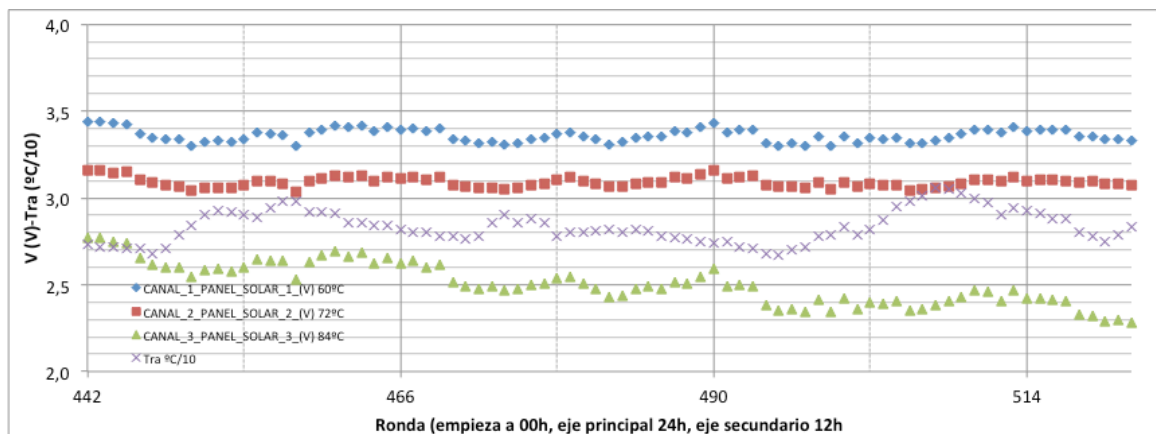
A continuación muestro las siguientes graficas donde podemos comprobar como la placa 6 y 10 continúan estables menos la placa 11 que se esta degradando.



Gráfica 5 : Medida continua de tensión y temperatura

En esta grafica se ha representado la evolución de la tensión del punto de máxima potencia de las tres placas y la temperatura ambiente del laboratorio:

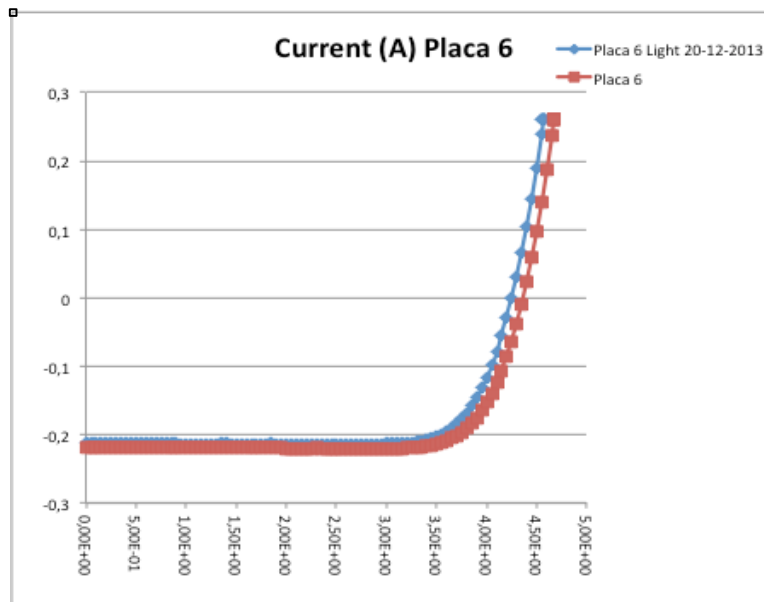
- La tensión del punto de máxima potencia de las tres placas es diferente debido a la temperatura en que se encuentran. La placa de menor temperatura, color azul, tiene un valor de tensión mayor.
- Las dos placas de menor temperatura, color azul y rojo, tienen pequeñas variaciones que se pueden achacar a las variaciones de la temperatura del laboratorio.
- Por otro lado en la placa de mayor temperatura, color verde, se observa una degradación del valor de tensión del punto de máxima potencia.



Gráfica 6 : Medida continua de tensión y temperatura

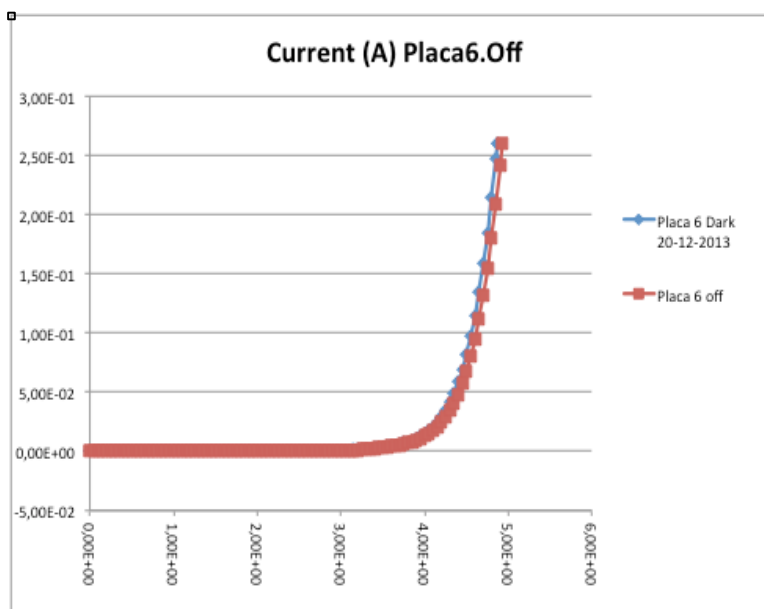
En esta ultima grafica apreciamos como la placa del canal 3 que corresponde con la placa numero 11 la cual esta a 84 °C se ha degradado considerablemente.

En estas graficas vamos a comparar como se han degradado las placas, empezamos con la placa numero 6 que es la que estaba refrigerada y a temperatura de 60°C, vemos la grafica tanto en iluminación como en oscuridad:



Grafica 7: Placa numero 6 comparación de degradación en iluminación

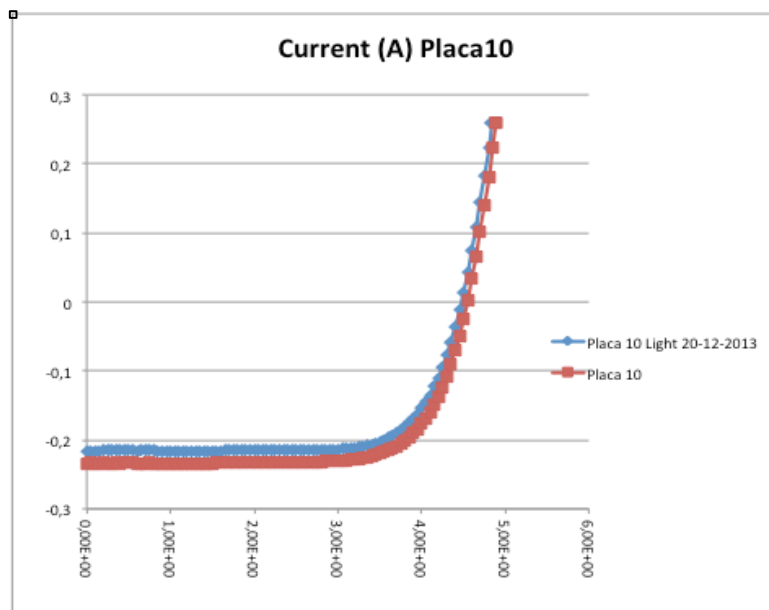
Ahora vemos la grafica en oscuridad:



Grafica 8: Placa numero 6 comparación de degradación en oscuridad

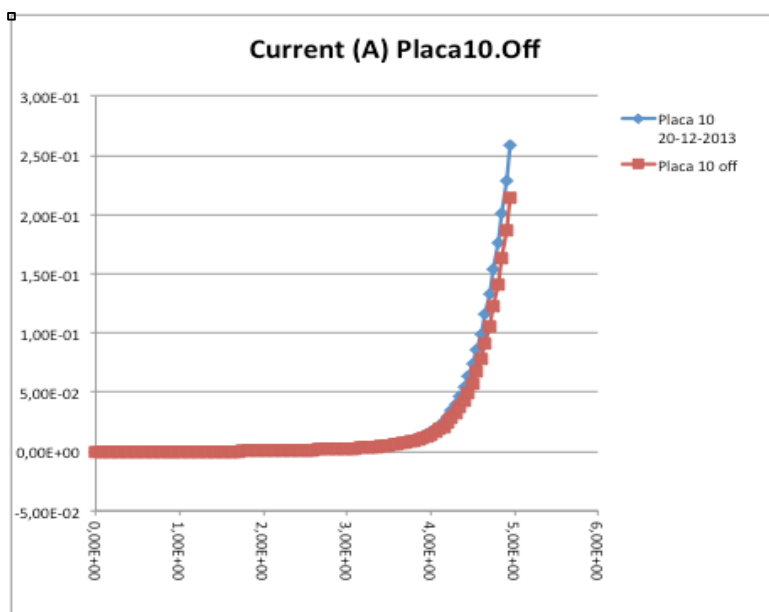
Vemos como la placa numero 6 al estar refrigerada y con una temperatura de trabajo normal en condiciones climáticas prácticamente no se ha degradado.

Continuamos con la placa numero 10 que estaba a una temperatura de 72°C



Grafica 9: Placa numero 10 comparación de degradación en iluminación

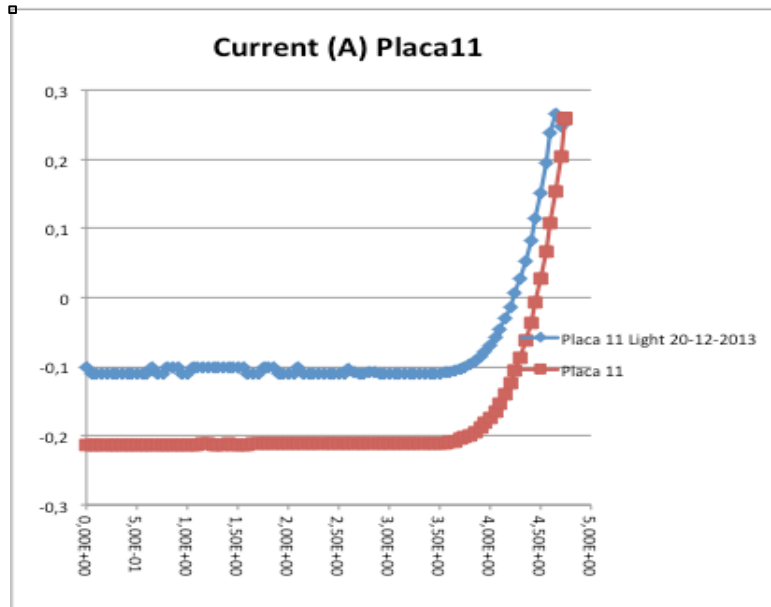
Ahora vemos la grafica en oscuridad:



Grafica 10: Placa numero 10 comparación de degradación en oscuridad

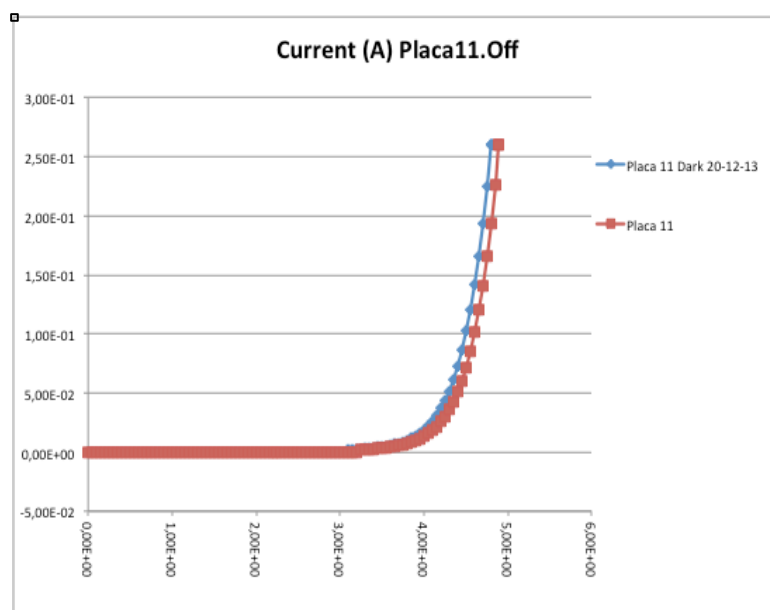
Aquí observamos como la placa numero 10 que esta sin refrigerar tampoco se ha degenerado.

Para terminar vemos las graficas de la placa numero 11 que hemos puesto a una temperatura de 84°C.



Grafica 11: Placa numero 11 comparación de degradación en iluminación

Ahora vemos la grafica en oscuridad:

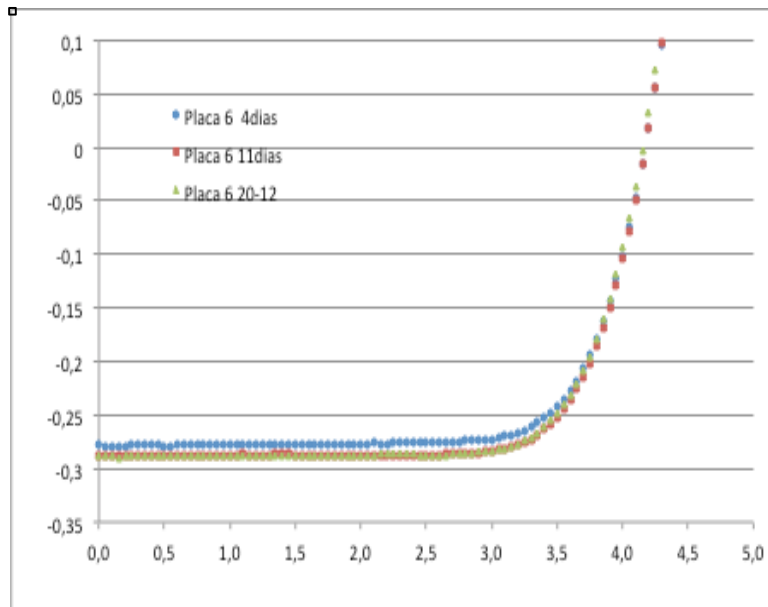


Grafica 12: Placa numero 11 comparación de degradación en oscuridad

Como podemos comprobar el alto grado de degradación que hemos conseguido en la placa numero 11 con respecto a las otras placas.

Ahora mostramos las mediciones que hemos hecho en cada placa transcurridos 4 días, 11 días y 20 días después de haber empezado el ensayo.

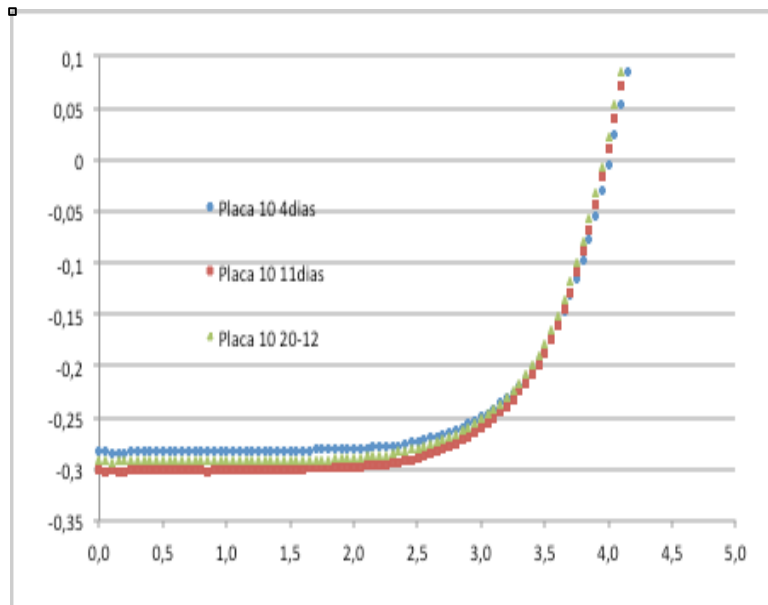
Empezamos placa numero 6:



Grafica 13: Evolución placa numero 6

Esta placa prácticamente no ha variado las únicas variaciones son debido a las variaciones en la temperatura de la sala.

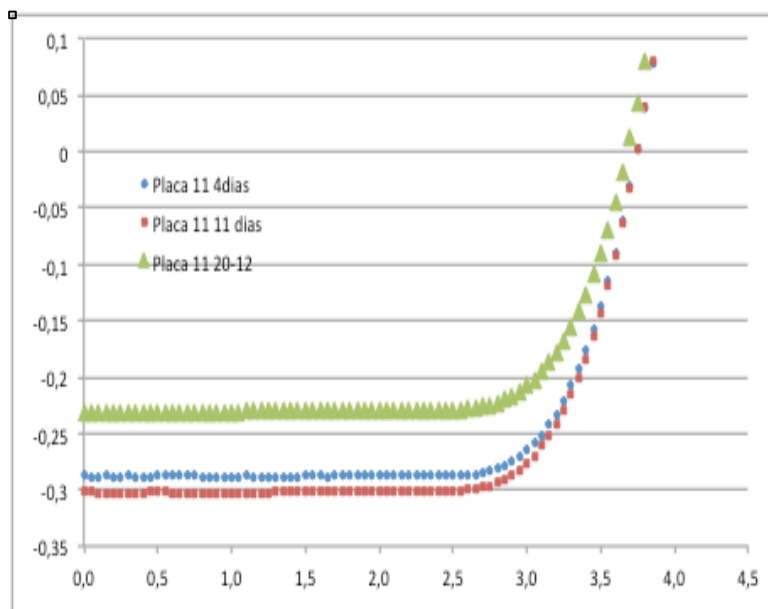
Placa numero 10:



Grafica 14: Evolución placa numero 10

Esta placa tampoco ha variado y las únicas variaciones son debidas a la variación de la temperatura en la sala.

Placa Numero 11:



Grafica 15: Evolución placa numero 11

En esta placa apreciamos como se ha ido degradando considerablemente

5.2 CONCLUSIONES CAPITULO 5

Como principales conclusiones de este capítulo tenemos:

- El banco de pruebas lleva funcionando más de 520 horas con fiabilidad y el programa también funciona perfectamente.
- De las medidas in situ del valor de la tensión en el punto de máxima potencia se observa que la célula que se encuentra a mayor temperatura se ha degradado mientras que las de menor temperatura no.
- Las medidas de las curvas I-V en iluminación corroboran la degradación de la placa de mayor temperatura

TEMA 6 – CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Es muy difícil realizar ensayo acelerados en cámaras climáticas con células solares por la dificultad de iluminar los módulos fotovoltaicos dentro de la cámara climática.

En este Proyecto Fin de Carrera se ha desarrollado un procedimiento de ensayos acelerados en módulos fotovoltaicos que permite realizar un ensayo acelerado en temperatura fuera de la cámara climática. Este procedimiento consta de dos sistemas:

- Sistema de caracterización de las placas.
- Sistema de ensayo acelerado.

A continuación vamos a describir los principales resultados del Proyecto Fin de Carrera:

- Relacionado con el sistema de caracterización de placas:
 - Se ha desarrollado un sistema automático de medida de curvas I-V en iluminación basado en el software propietario de Keithley 2601. El software TSB (Team Software Builder) ha sido adaptado para medir las curvas I-V en iluminación y oscuridad de los minimódulos fotovoltaicos.
 - Mediante este sistema se han caracterizado las curvas I-V de los 18 minimódulos y a partir de estas se han medido se han seleccionado las tres placas con prestaciones más parecidas.
 - El sistema de caracterización de curvas I-V se utilizará periódicamente a lo largo del ensayo para evaluar la evolución de las prestaciones de los módulos.
- Relacionado con el sistema de ensayos acelerado:
 - Se ha diseñado e implementado un banco de pruebas de ensayos acelerados en el que las tres placas han estado funcionando en el punto de máxima potencia iluminado a una irradiancia de 1000W/m^2 a tres temperaturas diferentes, 60°C , 72°C y 84°C . Estas temperaturas se consiguen refrigerando la de 60°C con un ventilador y calentando la de 84°C con una resistencia colocada en la parte posterior.

- Para monitorizar el sistema acelerado se ha desarrollado un programa en Labview que mide cada 60 minutos la tensión en el punto de máxima potencia de cada una de las placas y la temperatura ambiente.
- Relacionado con los resultados del ensayo:
 - El sistema desarrollado se ha demostrado es fiable y ha estado funcionado más de 500 horas.
 - A lo largo de este ensayo se ha observado que los módulos que se encontraban a 60°C y 72°C prácticamente no presentan degradación mientras que el de 84°C, muy cercano a los 85°C especificados como máxima temperatura, se degrada progresivamente.

Aunque los resultados obtenidos han sido muy satisfactorios hemos detectado algunos temas que pueden mejorar el ensayo y que planteamos como trabajos futuros:

- La principal limitación de estos ensayos son la fiabilidad de los focos de iluminación por lo que sería muy interesante poder realizar estos ensayos en exteriores con la iluminación del Sol acelerando en temperatura mediante los sistemas utilizados en este Proyecto de Fin de Carrera. Trabajar en exteriores presenta dificultades como:
 - Llevar todo equipamiento en exteriores por lo que necesitaríamos una caseta para que los equipos pudieran trabajar correctamente.
 - Sería necesario monitorizar la irradiancia y la temperatura de forma constante para poder evaluar los resultados.

Por lo tanto, se puede decir que este Proyecto Fin de Carrera ha abierto nuevas posibilidades para realizar ensayos acelerados en módulos fotovoltaicos que serán desarrollados en futuros trabajos de investigación.

Bibliografía

Electricidad Solar Fotovoltaica

Volumen 2: Radiación solar y dispositivos Fotovoltaicos por E. Lorenzo

Manuel Vázquez y Ignacio Rey-Stolle, Photovoltaic Module Reliability Model Based on Field Degradation Studies. Photovoltaic Res. Appl. 2008; 16:419–433.

Manuel Vázquez. Elementos de una instalación solar fotovoltaica. Asignatura Ingeniería Fotovoltaica.

Manuel Vázquez. Sistemas Fotovoltaicos conectados a red. Asignatura Ingeniería Fotovoltaica.

Manuel Vázquez y Neftalí Núñez. Escenario Energético Actual. Asignatura Energías Renovables.

Manuel Vázquez. Introducción Fiabilidad. Asignatura Ensayos para la producción.

Manuel Vázquez. Análisis de datos. Asignatura Ensayos para la producción.

Manuel Vázquez. Tipos y planes de ensayos. Asignatura Ensayos para la producción.

Key World Energy Statistics 2013. International Energy Agency.

Manual de Geotermia. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

BP Statistical Review of World Energy June 2013.

Paginas de internet

<http://www.monografias.com>

<http://www.tecnun.es>

<http://upcommons.upc.edu>